

VERS UNE ÉLECTRIFICATION DE LA COLLECTE DES MATIÈRES RÉSIDUELLES MUNICIPALES?

Par
Julien Mussard

Essai présenté au Centre universitaire de formation
en environnement et développement durable en vue
de l'obtention du grade de maîtrise en environnement (M. Env.)

Sous la direction de Mario Laquerre

MAÎTRISE EN ENVIRONNEMENT
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Juillet 2020

Erratum. Une première version de cet essai, dont le contenu était disponible entre le 13 et le 28 mai 2020 comportait des données qui ont été associées erronément à la compagnie Effenco. Les données sur la technologie hybride qui ont servi de base comparative dans cette étude sont tirées d'une étude portant sur des camions hybrides circulant aux États-Unis.

SOMMAIRE

Mots clés : collecte et transport des matières résiduelles, électrification des transports, véhicule électrique, efficacité énergétique, carburant vert, transition énergétique.

L'objectif de cet essai est d'analyser les gains environnementaux et économiques associés à l'électrification des transports dans le secteur de la collecte des matières résiduelles dans un contexte municipal québécois. Afin de respecter les différents accords internationaux que le Canada a conclus concernant les gaz à effet de serre, le Québec a entrepris une série de mesures : l'électrification des transports en fait partie. Le transport est responsable de plus de 40 % des émissions de la province. Plusieurs municipalités québécoises ont suivi le mouvement et ont rédigé des plans d'action spécifiques, mais peu ont posé d'actions concrètes dans le secteur de la collecte et du transport des matières résiduelles. Un camion de collecte conventionnel au diesel consomme beaucoup de carburant, ses nombreux arrêts et redémarrages en sont en partie la cause. Des solutions alternatives à l'utilisation des hydrocarbures conventionnels existent et ont été éprouvées au Québec et dans le monde.

L'analyse des impacts de plusieurs technologies (camion au diesel, au biodiesel, au gaz naturel, hybride, électrique et à l'hydrogène) démontre que l'électrification est la meilleure solution pour les municipalités québécoises. D'une part, elle permet de couper en moyenne plus de 50 % des frais d'exploitation. D'autre part, la faible empreinte carbone de l'électricité québécoise favorise son déploiement comme solution d'évitement de gaz à effet de serre. En parallèle, l'électrification de la collecte contribue à l'amélioration de la santé et de la qualité de vie des citoyens en proposant un service moins bruyant et avec les plus bas taux d'émissions de substances cancérigènes.

Les conclusions de l'étude démontrent que l'électrification de la collecte est un des leviers d'actions pour les municipalités afin de réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. Par ailleurs, elle n'est actuellement applicable qu'à un contexte urbain où les contraintes et les enjeux sont différents de ceux d'une municipalité rurale. Pour arriver au plein potentiel de cette filière, il faut miser davantage sur la planification des tournées, et sur la volonté politique des municipalités. Parmi les recommandations formulées pour les intervenants municipaux, notons l'ajout de clauses environnementales dans les appels d'offres, et la mise en place d'un règlement municipal sur les émissions polluantes dans les grands centres urbains. Ces mesures permettront de renforcer l'usage de carburant alternatif au diesel dans le secteur de la collecte.

REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier mon directeur d'essai monsieur Mario Laquerre pour sa présence et son accompagnement tout au long de mon écriture. Ce travail m'a permis d'utiliser les connaissances et l'expérience que j'ai acquise tout au long de mon enseignement supérieur.

Merci également à François Lafortune pour son écoute, la mise en contact avec Mario et ses réponses à mes questionnements sur le bilan carbone des véhicules électriques.

Merci à l'ensemble du corps enseignant que j'ai eu la chance de côtoyer tout au long de mon enseignement supérieur. J'ai la chance d'avoir reçu un enseignement de très haute qualité grâce à vous. Merci à toutes les personnes que j'ai contactées dans le cadre de mon essai qui ont su m'apporter leur vision d'expert dans le domaine.

Je tiens également à remercier la direction du CUFE, notamment Judith Vien, pour m'avoir guidé lors du processus de sélection de mon sujet d'essai. Merci à l'ensemble de mes tuteurs de stage qui ont vu en moi un potentiel de développement et qui m'ont inspiré tout au long de mon parcours.

Un merci également à la direction de IMT Alès, mon école d'ingénieur en France, pour m'avoir permis d'effectuer cet échange. Cela m'a permis de m'ouvrir l'esprit, de découvrir un nouveau pays et de faire de belles rencontres.

Je tiens à remercier tous mes amis, qui ont su m'épauler dans les moments difficiles comme dans les parties les plus agréables de mon parcours. Finalement, je remercie ma famille pour leur écoute et leur encouragement.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
1 MISE EN CONTEXTE	3
1.1. Changement climatique et rapport du GIEC	3
1.2. L'électrification des transports au Québec	5
1.3. Profil GES des municipalités	10
2. LE TRANSPORT ET LA COLLECTE DES MATIÈRES RÉSIDUELLES AU QUÉBEC	14
2.1. L'historique de la collecte	14
2.2. Les types de collecte	15
2.3. Fonctionnement des appels d'offres et des contrats de collecte au Québec.....	17
3. LES RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES DONT DISPOSE LE QUÉBEC	20
3.1. Les hydrocarbures et le potentiel des biocarburants	20
3.1.1 Biocarburant.....	20
3.1.2 Déchet	21
3.1.3 Biodiésel	22
3.2. Le gaz naturel	23
3.2.1 Biométhanisation	24
3.3. L'hydroélectricité du Québec : un avantage concurrentiel.....	25
4. PORTRAIT DES TECHNOLOGIES UTILISÉES POUR LA COLLECTE AU QUÉBEC	28
4.1. Le cas par défaut : l'utilisation du diésel.....	28
4.2. L'utilisation de biocarburant	30
4.3. L'utilisation du gaz naturel	32
4.4. L'amélioration de l'efficacité des camions de collecte	35
4.5. L'utilisation de l'électricité	37
5. PORTRAIT DES TECHNOLOGIES ALTERNATIVES POUR LA COLLECTE DANS LE MONDE	41
5.1. Des camions de collecte au gaz naturel	41
5.2. Des camions de collecte hybrides	43
5.3. Des camions de collecte tout électriques	45
5.4. Vers les camions à hydrogène.....	47
6. ANALYSE PAR CYCLE DE VIE DES TECHNOLOGIES DE COLLECTE	48
6.1 Méthode d'analyse.....	48
6.2 Résultat de l'analyse cycle de vie	50
7. LES GAINS ENVIRONNEMENTAUX ET ÉCONOMIQUES DE L'ÉLECTRIFICATION	53

7.1.	Choix des circuits de collecte simulés	53
7.2.	Critère d'évaluation et pondération	57
7.3.	Évaluation des gains	62
7.3.1.	Les données de l'étude pour les différents carburants.....	62
7.3.2.	Simulation des gains économiques et environnementaux	63
7.4.	Prise de position	66
8.	OPÉRATIONNALISATION D'UNE COLLECTE ÉLECTRIQUE.....	67
8.2.	Des préalables techniques	68
8.3.	Des préalables réglementaires.....	71
8.4.	Des préalables politiques	72
9.	RECOMMANDATIONS.....	74
9.1.	Ajouter des clauses environnementales dans les appels d'offres	74
9.2.	Rédiger, mettre en place et faire appliquer une réglementation municipale dans les grands centres urbains pour limiter les émissions de polluants nocifs à la santé humaine (NOx, COV, etc.).....	74
9.3.	Collecter, documenter, partager et rendre public les données de consommation de la collecte des matières résiduelles.	75
9.4.	Communiquer sur l'importance de sortir ses bacs uniquement lorsqu'ils sont pleins	75
9.5.	Analyser les options de mutualisation du service de collecte entre municipalité et MRC adjacentes	75
	CONCLUSION	77
	RÉFÉRENCES	79
	ANNEXE 1. IMPACTS DE DIFFÉRENTES FILIÈRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ	101
	ANNEXE 2. DONNÉE DE CONSOMMATION DE DIFFÉRENTES FLOTTES DE CAMION DE COLLECTE AU DIÉSEL	102
	ANNEXE 3. POURCENTAGE DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS ATMOSPHÉRIQUES EN FONCTION DE L'ORIGINE DU BIODIÉSEL (B20)	103
	ANNEXE 4. ENERGIE NÉCESSAIRE POUR L'UTILISATION DES ÉQUIPEMENTS DE COLLECTE (COMPACTAGE ET BRAS MÉCANISÉ)	104
	ANNEXE 5. DÉTAILS DES PROJETS DE CAMION ÉLECTRIQUE DE COLLECTE CIRCULANT DANS LE MONDE	105
	ANNEXE 6. DÉTAILS DES DONNÉES DES SERVICES DE COLLECTE (MRC DE JOLIETTE, VILLE DE SHERBROOKE, AGGLOMÉRATION DE MONTRÉAL)	109
	ANNEXE 7. DÉTAILS DES DONNÉES UTILISÉS POUR L'ANALYSE DES TECHNOLOGIES	112
	ANNEXE 8. DÉTAILS DES CALCULS POUR LES ÉMISSIONS DE GES SUR L'ENSEMBLE DU CYCLE DE VIE DES TECHNOLOGIES ÉTUDIÉES	114

ANNEXE 9. DÉTAILS DES GAINS ÉCONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX DES TECHNOLOGIES ÉTUDIÉS POUR L'AGGLOMÉRATION DE MONTRÉAL, LA VILLE DE SHERBROOKE, ET LA MRC DE JOLIETTE	118
ANNEXE 10. DÉTAILS DE L'ANALYSE MULTICRITÈRE.	124

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1.1	Les émissions globales de gaz à effet de serre du Canada entre 1990 et 2015.....	3
Figure 6.1	Périmètre de l'analyse de cycle de vie	48
Figure 6.2	Graphique des émissions de GES des différentes technologies de collecte et de transport.....	51
Figure 6.3	Réduction des GES en fonction de la distance parcourue par un camion de collecte par rapport au diesel.....	52
Tableau 1.1	Émissions GES des municipalités québécoises	10
Tableau 4.1	Impact d'un camion de collecte au diesel de 9 tonnes sur son environnement.....	29
Tableau 4.2	Impact associé à l'utilisation d'un camion de collecte au GNC	34
Tableau 5.1	Impact d'un camion de collecte au diesel de 26 tonnes à Milan	42
Tableau 6.1	Donnée utilisée pour l'analyse des émissions GES sur l'ensemble du cycle de vie des camions de collecte	49
Tableau 6.2	Résultat de l'analyse cycle de vie des différentes technologies de collecte et de transport.....	51
Tableau 7.1	Synthèse des données de la collecte des villes étudiées.....	54
Tableau 7.2	Liste des critères et leurs pondérations	58
Tableau 7.3	Gains environnementaux et économiques pour les cas étudiés.....	63
Tableau 7.4	Synthèse des résultats de l'analyse multicritère sous forme de pourcentage.....	66

LISTE DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES

AEC	Attestation d'étude collégiale
AVEQ	Association des véhicules électriques du Québec
CFC	Chlorofluorocarbure
CH ₄	Méthane
CO ₂ eq	Dioxyde de carbone équivalent
COP	Conférence des parties
COV	Composé organique volatil
CPC	Cadre pancanadien
CRD	Matériaux de construction, rénovation et de démolition
EEQ	Éco Entreprises Québec
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GNC	Gaz naturel comprimé
GNL	Gaz naturel liquifié
GNR	Gaz naturel renouvelable
GW	Giga watt
HFC	Hydrofluorocarbure
INRS	Institut national de la recherche scientifique
IREQ	Institut de recherche d'Hydro-Québec
km ³	kilomètre cube
ktCO ₂ eq	Kilo tonne de dioxyde de carbone équivalent
MELCC	Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MERN	Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles
MRC	Municipalité régionale de comté
MtCO ₂ eq	Méga tonne de dioxyde de carbone équivalent
MW	Méga watt
NO _x	Oxydes d'azote
PECC	Plan d'électrification et de changements climatiques

PGMR	Plan de gestion des matières résiduelles
RTC	Réseau de transport en commun
SEAO	Système électronique d'appels d'offres
SOx	Oxydes de soufre
TWh	Téra wattheure
VFE	Véhicule à faible émission
VZE	Véhicule zéro émission

LEXIQUE

Appel d’offres public	Procédure d’appel à la concurrence entre plusieurs fournisseurs afin d’obtenir une soumission ou une offre de service la plus performante et la plus adaptée. Les services municipaux doivent obligatoirement passer par un processus d’appel d’offres public. (Le système électronique d’appel d’offres du gouvernement du Québec [SEAO], 2019).
Biodiésel	Produit à partir de matière organique non fossile, provenant de la biomasse permettant d’obtenir un substitut au carburant fossile : par exemple issu d’huile végétale (maïs, blé, canola, soya, etc.) ou animal (graisse) pour la 1 ^{re} génération. (Ministère de l’Energie et des Ressources naturelles [MERN], 2020a).
Certification ISO 14001	Propose un cadre pour les entreprises et les organisations afin de faire une meilleure gestion de l’environnement au sein de ces activités, produits et services. (Organisation internationale de normalisation [ISO], 2020)
Collecte intelligente	Collecte utilisant un système de suivi des levés des bacs des citoyens (chaque bac est équipé d’une puce permettant de faire une lecture lors de sa levée). (Ville de Beaconsfield, 2019).
Collecte porte-à-porte	Collecte des bacs des citoyens suivant un circuit prédéfini. Le bac de déchet, de recyclage, et de matières organiques sont collectés suivant un circuit de collecte défini avec une fréquence de collecte qui est variable suivant la zone et la municipalité (Agence de l’Environnement et de la Maîtrise de l’Energie [ADEME], 2018).
Écocentre	Lieu où les citoyens peuvent apporter des matières résiduelles spécifiques qui ne sont pas prises en charge par la collecte en porte-à-porte par exemple des objets trop lourds ou volumineux. (Kachanova, 2014).
Kilowattheure	Unité de mesure de l’énergie, 1 kWh correspondant à 1 000 watts pendant 3 600 secondes (1 heure). (Hydro-Québec, 2019d).
Norme ISO 14064-1	Document de référence qui détaille les principes directeurs à suivre au niveau des organismes et des entreprises afin de quantifier et rédiger des rapports sur les émissions de gaz à effet de serre (GES). (ISO, 2006).
Véhicule de collecte	Camion de collecte équipé d’un bras assisté ou non permettant d’effectuer la collecte des matières résiduelles en porte-à-porte. (Arsenault, 2008).
Véhicule zéro émission	Véhicule n’émettant pas de gaz à effet de serre lors de sa phase d’opération. La motorisation est électrique. (Akendi, 2018).

INTRODUCTION

Les changements climatiques ne sont plus à démontrer au Québec : une élévation de la température moyenne annuelle jusqu'à 1,5 °C a été observée au Québec dans la période 1960-2008. (Gouvernement du Québec, 2012). Pour limiter les effets du réchauffement climatique, le Québec a actuellement un plan d'action ambitieux qui tire à sa fin (2020). Ce plan encourage les municipalités à planifier leurs actions dans une optique de réduction des gaz à effet de serre (GES). (Gouvernement du Québec, 2012). Pour assurer la continuité de ces actions, le gouvernement est actuellement en cours d'élaboration du futur Plan d'électrification et de changements climatiques (PECC) pour atteindre la cible de réduction des émissions de GES du Québec à l'horizon 2030. Selon le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC), le transport routier représente plus de 90,9 % des GES d'une municipalité québécoise. (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques [MELCC], 2018c). La transition énergétique dans le secteur du transport municipal peut prendre la forme de diverses solutions : par exemple, l'électrification du réseau de transport en commun. Cependant, plus de 45 % des émissions de GES proviennent des camions lourds utilisés notamment pour la collecte des matières résiduelles. (MELCC, 2018c). En effet, un camion de collecte s'arrête à chaque maison sur son circuit. Chaque redémarrage demande une quantité d'hydrocarbure qui pourrait être évitée en utilisant d'autres technologies.

Des solutions alternatives à l'utilisation des hydrocarbures conventionnels existent au Québec et dans le monde. L'objectif de ce travail est d'évaluer les gains environnementaux et économiques de ces nouvelles technologies de collecte des matières résiduelles dans un contexte municipal. Pour atteindre cet objectif, quatre sous-objectifs ont été formulés. Le premier sous-objectif vise à documenter les ressources énergétiques dont dispose le Québec ainsi que les technologies de collecte existantes, à savoir les différents types de camions de collecte et leur consommation. Le second sous-objectif permet de faire l'évaluation des gains environnementaux et économiques de chaque technologie en fonction du contexte de la municipalité et de la municipalité régionale de comté (MRC). Les gains seront analysés en prenant comme cas par défaut le camion diesel avec une benne hydraulique. Le troisième sous-objectif vise à identifier des préalables logistiques, techniques et réglementaires pour l'implantation d'un camion tout électrique. Finalement le quatrième sous-objectif permet d'établir des recommandations pour intégrer progressivement l'utilisation des technologies propres au sein de la collecte des matières résiduelles au Québec.

La réalisation de ce travail repose sur une méthodologie rigoureuse. Le travail se découpe en quatre grandes étapes permettant d'atteindre les quatre sous-objectifs présentés ci-dessus. Premièrement, une revue de la littérature et la communication avec les acteurs principaux du milieu de la collecte municipale ont permis de récolter des données exhaustives et actualisées. Les sources d'informations ont été vérifiées et triées en respectant les critères suivants : la provenance, l'expertise de l'auteur, l'objectivité, l'actualité des données. Deuxièmement, une analyse par cycle de vie a été réalisée. Elle a été opérée par un bilan carbone sur l'ensemble du cycle de vie des différents camions de collecte permettant d'obtenir une émission de GES en fonction de la distance parcourue. Les données utilisées pour le bilan carbone proviennent des bases de données fiables et récentes du Canada et du gouvernement du Québec. Cette étape a permis d'obtenir des données cohérentes et uniformes pour les différentes technologies de collecte afin de réaliser la troisième étape : l'analyse des avantages économiques et environnementaux de l'utilisation de carburant vert pour la collecte des matières résiduelles. Cette analyse se base sur des cas concrets de municipalités et de MRC. Les données utilisées pour effectuer la simulation proviennent des documents municipaux officiels d'actualités. Les résultats de cette analyse permettent de prendre position sur la technologie à privilégier suivant le type de circuit. Finalement, la quatrième étape vise à dresser une liste de conditions facilitant la transition vers les technologies propres en fonction de critères techniques, logistiques, réglementaires et politiques. Ce qui permettra de formuler des recommandations pertinentes et adaptées au contexte actuel du monde municipal.

Cet essai est organisé en neuf chapitres. Le premier chapitre fixe le contexte actuel du Québec sur le sujet des changements climatiques. Il permet de faire un rappel des objectifs et des actions du Québec face à lutte contre le réchauffement climatique. Le second chapitre dresse un portrait du transport et de la collecte des matières résiduelles au Québec. Il permet de mettre l'accent sur l'évolution des techniques de collecte et des contrats. Le troisième chapitre permet de documenter les ressources énergétiques dont dispose le Québec. Ainsi le lecteur aura une vision d'ensemble sur les énergies disponibles et exploitables par le secteur du transport. Le quatrième et le cinquième chapitre proposent une revue des technologies de collecte au Québec et dans le monde. Le sixième chapitre présente le bilan carbone des différentes technologies de collecte au Québec. Le septième chapitre permet de montrer les gains économiques et environnementaux liés à l'utilisation de carburant vert pour la collecte des matières résiduelles. Finalement, le huitième et le neuvième chapitre permettent d'explicitier les détails des contraintes liés à l'électrification de la collecte. Ils identifient des préalables pour faciliter la transition énergétique et formulent des recommandations afin d'effectuer cette transition vers les carburants verts.

1 MISE EN CONTEXTE

Le Canada a pris à plusieurs reprises des engagements de lutte contre le réchauffement climatique. Des actions ont été identifiées et mises en place au cours de cette dernière décennie, mais ne semblent pas être efficaces pour l'atteinte des objectifs cibles. Comme le transport apparaît comme l'un des secteurs avec le plus d'impact, une électrification de celui-ci permettrait de ralentir l'augmentation des émissions de GES. Plusieurs grandes municipalités québécoises ont déjà entamé des actions et mesures pour réduire les émissions de ce secteur.

1.1. Changement climatique et rapport du GIEC

Les accords réalisés à Paris en 2015 ont permis aux gouvernements de renforcer leur initiative face au réchauffement climatique en poursuivant les actions menées afin de limiter l'élévation de température à 1,5 °C. (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [GIEC], 2019a). Le Québec s'est placé comme le plus actif des états fédérés d'Amérique du Nord en dépassant en 2012 son objectif de +2 %. (Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques [MDDELCC], 2017). La figure 1.1 représente les objectifs de réduction du Canada et les émissions carbone.

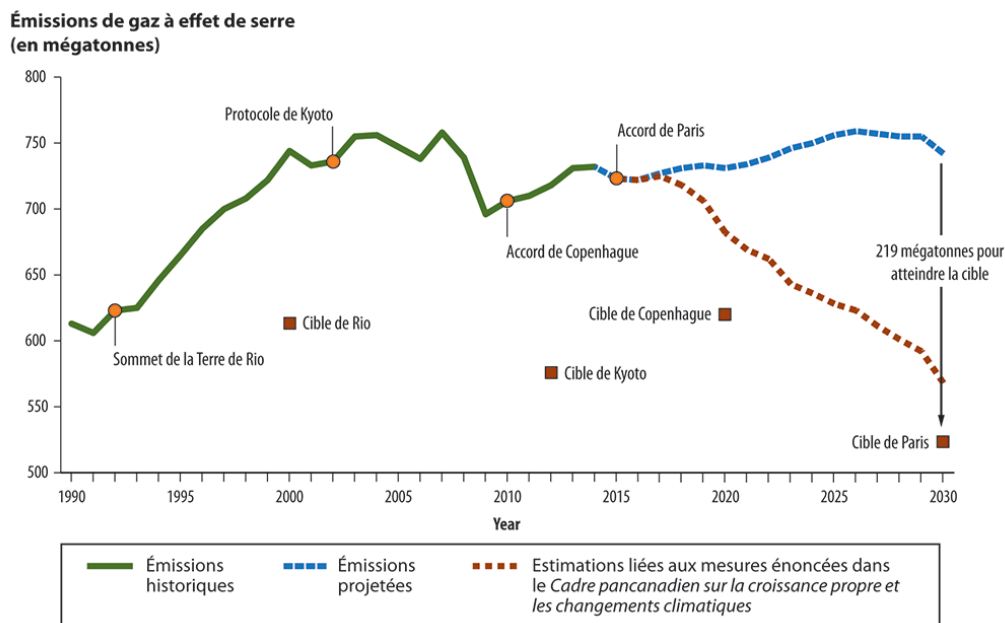


Figure 1.1 Les émissions globales de gaz à effet de serre du Canada entre 1990 et 2015 (tiré de Bureau du vérificateur général du Canada, 2017.)

Selon le rapport du GIEC, l'élévation de la température planétaire a déjà atteint les +1 °C. Les conséquences de ce réchauffement s'illustrent à travers les nombreux événements climatiques

extrêmes, la fonte des glaciers, l'augmentation du niveau des océans, etc. Il est difficile pour certains pays de respecter l'objectif de +1,5 °C, mais celui de +2 °C est atteignable. Le seul 0,5 °C de différence aurait des conséquences sur la durée des vagues de chaleur, sur l'intensité et la durée des précipitations, sur la disparition des glaces en Arctique l'été, etc. (Hoegh-Gulberg et al., 2018).

Lors des Accords de Paris, le Canada s'était fixé comme objectif une réduction de 30 % par rapport à 2005. Cependant, les projections réalisées en 2018 démontrent que la réduction réalisée en 2030 pourrait avoisiner les 4 %. D'autres scénarios de réduction ont été réalisés et permettent de fixer des actions afin d'atteindre l'objectif prévu en 2030. (Environnement et Changement climatique Canada, 2019). Le Canada comme beaucoup de pays ont des difficultés à atteindre leur objectif fixé lors des différents regroupements mondiaux. En effet, ni la cible de Rio, ni celle de Kyoto, ni celle de Copenhague n'ont été atteintes. La cible de Paris demande une réduction de 219 mégatonnes de dioxyde de carbone équivalent (MtCO₂eq) alors que la courbe des émissions des gaz à effet de serre du Canada ne fait qu'augmenter (voir figure 1.1). (Bureau du vérificateur général du Canada, 2017).

Le Québec s'était fixé comme objectif une réduction de 37,5 % de ces émissions de GES à l'horizon 2030 par rapport à 1990. Ce qui correspond à une émission permise de 57 MtCO₂eq. En 2020, le Québec se situe vers 80 MtCO₂eq. (Dunsky, 2019). Le plan d'action du Québec en matière de réduction des GES rédigés en 2012 n'a pas respecté son objectif de réduction de 20 % par rapport à 1990, soit atteindre les 67 MtCO₂eq. (Gouvernement du Québec, 2012).

Une transition rapide vers le développement durable permettrait d'améliorer notre capacité d'adaptation à ces changements et mettre à profit les services écosystémiques. D'ailleurs, l'inaction se reflète dans une augmentation des coûts et une amplification des risques à prendre. (GIEC, 2019b).

L'électrification est une option pour atteindre l'objectif +1,5 °C qui nécessite des actions immédiates à plus grande échelle et à l'échelle mondiale. Pour atteindre l'objectif pour 2030, il faudrait que le transport incorpore 49 % d'électricité dans ses sources d'énergie. Des scénarios cohérents avec +1,5 °C dépendent d'une réduction d'environ 15 % de la consommation finale d'énergie par le secteur des transports d'ici 2050 par rapport à 2015. L'électrification des camions de transport apparaît comme une innovation permettant d'atteindre l'objectif de +1,5 °C. (De Coninck et al., 2018).

Le Québec profite d'un fort potentiel d'électrification due à sa source d'énergie à bas carbone : l'hydroélectricité. Les infrastructures d'Hydro-Québec pourraient faciliter l'électrification par la souplesse du stockage de l'énergie via les barrages afin de mieux gérer les pointes. Le rapport de Dunsky

sur les trajectoires de réduction des émissions de GES du Québec propose des solutions pour les horizons 2030 et 2050. Cependant, cette modélisation du système québécois repose sur de nombreuses hypothèses. Il estime qu'une réduction de 22 % des émissions de GES du secteur du transport permettrait d'atteindre l'objectif fixé pour 2030. (Dunsky, 2019). La commission sur les enjeux énergétiques du Québec a publié un rapport en 2014, où elle recommande au gouvernement d'instaurer des mesures de réduction de la consommation de produit pétrolier afin d'atteindre les objectifs de réduction de GES. Elle recommande une réduction de 20 %, qui pourrait être atteinte en instaurant des freins à la consommation d'hydrocarbure dans le secteur du transport. (Ministère des Ressources naturelles [MRN], 2014).

1.2. L'électrification des transports au Québec

En 2016, le Québec a émis 78,6 MtCO₂eq, soit environ 9,6 tonnes de CO₂eq par habitant. Le secteur du transport représente à lui seul 43 % des émissions québécoises. La circulation des véhicules lourds représente plus de 12 % des émissions de GES du Québec. (MELCC, 2018a).

Le secteur du transport à lui seul consomme 75 % des produits pétroliers utilisés au Québec à des fins énergétiques. Les émissions de GES liées au produit pétrolier correspondent à 81 % des émissions du Québec, et le secteur du transport en émet 43 % en 2013 (24 MtCO₂eq en 2013). (Gouvernement du Québec, 2016).

Le gouvernement du Québec s'est doté d'un plan d'action afin de réduire les émissions de GES dans le secteur du transport. Il s'engage à :

- Accompagner les entreprises et les ménages dans leur choix d'acquisition d'un véhicule zéro émission (VZE) (en incluant les véhicules à hydrogène);
- Travailler avec les états et les provinces afin de développer un marché de véhicules à zéro émission;
- Continuer les efforts réalisés en partenariat avec les gouvernements canadien et américain pour l'application des normes d'émissions contraignant les constructeurs à limiter la consommation de carburant de leur véhicule;
- Développer un réseau de distribution de carburant à faibles teneurs en carbone et des bornes de recharges;

- Mettre en place un projet pilote de station multicarburant (essence, biocarburant, gaz naturel, propane, électricité, hydrogène) d'ici 2030 afin d'incorporer une offre multicarburant obligatoire pour les stations (sous la forme d'une révision des autorisations gouvernementales);
- Soutenir l'objectif d'Énergir d'augmenter de 15 % la flotte de véhicule lourd roulant au GNL (gaz naturel liquéfié) ou au GNC (gaz naturel comprimé) d'ici 2030.

(Gouvernement du Québec, 2016)

À l'occasion de la conférence des parties (COP) de 2016, le rapport du cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques (CPC) est publié dans le but d'établir une stratégie de réduction des émissions des GES pour atteindre les objectifs fixés pour 2030. Un engagement commun a été pris avec d'autres pays de la coalition, à savoir la Chine, la France, le Japon, la Norvège, la Suède, le Royaume-Uni et les États-Unis. Cela concerne l'incorporation de véhicule électrique au sein des parcs de véhicules gouvernementaux. Un guide a été rédigé pour aider les gestionnaires de parcs à mettre en place une procédure pour limiter leur impact environnemental. Le guide offre un aperçu des types de véhicules à faibles émissions de carbone (VFE) et de l'infrastructure de ravitaillement liée. (Akendi, 2018).

Le gouvernement du Canada a pris comme initiative d'atteindre 80 % de VZE dans les parcs de véhicule gouvernementaux d'ici 2030. (Akendi, 2018). Au niveau du Québec, le gouvernement prévoit l'intégration de 1 000 véhicules électriques ou hybrides dans son parc d'ici 2020. Il a fait la demande à Hydro-Québec de faire la promotion du véhicule électrique ou hybride auprès de ses clients. (Akendi, 2018).

Les annonces des constructeurs automobiles sur leurs objectifs de production d'ici 2025 peuvent laisser croire que le nombre de véhicules électriques présents sur les routes va quadrupler voire septupler. (Akendi, 2018). En 2018, le Québec dénombrait 24 422 véhicules électriques ou hybrides immatriculés. Pour atteindre l'objectif de 100 000 véhicules d'ici 2020, il faudrait que ce chiffre suive une évolution exponentielle. (Association des Véhicules Électriques du Québec [AVEQ], 2018). Selon les derniers chiffres de l'AVEQ, le Québec avait atteint la barre des soixante milles en 2019. À ce rythme l'objectif devrait être atteignable à la fin de l'année 2020. (AVEQ, 2019)

Le Centre de gestion de l'équipement roulant du gouvernement du Québec propose un service d'aide pour les municipalités pour leur apporter une expertise en matière de véhicule électrique. Il offre un accompagnement pour faciliter la transition électrique. Cela comprend une aide pour le choix des

véhicules en fonction de vos besoins, une planification de votre budget et des risques associés, un accès à un réseau d'ateliers de mécanique spécialisés. (Centre de gestion de l'équipement roulant, 2017a). Ils ont mis à la disposition des municipalités un guide d'achat à l'aide d'un questionnaire détaillé permettant de mieux cibler les besoins. (Centre de gestion de l'équipement roulant, 2017b).

Le gouvernement du Canada a mis en œuvre les règlements suivants pour réduire les émissions de GES : *Règlement sur les émissions de gaz à effet de serre des automobiles à passagers et des camions légers* pour les modèles de 2011 à 2016 et le *Règlement sur les carburants renouvelables*. Le *Règlement sur les carburants renouvelables* fixe un taux de 5 % production de carburant à partir de sources renouvelables dans l'essence, et un taux de 2 % pour le diesel. Le gouvernement a aussi mis en place un budget pour financer la production intérieure de biocarburant (éthanol et biodiesel). Il finance également la recherche et le développement pour les véhicules électriques afin d'améliorer leur conduite en hiver, augmenter la sécurité, et l'efficacité de la technologie dans le secteur des véhicules lourds. (Gouvernement du Canada, 2017).

En 2014, il est estimé que les véhicules lourds contribuaient à plus de 8 % des émissions de GES du Canada. (Environnement Canada, 2017). Les véhicules lourds contribuent principalement à l'émission de polluant atmosphérique comme les oxydes d'azote (NOx). Pour limiter cet impact, le Canada a publié le *Règlement sur les émissions des véhicules routiers et de leurs moteurs* qui fixe des normes d'émissions pour les moteurs des véhicules lourds à partir de l'année modèle 2007. (Gouvernement du Canada, 2017). Le gouvernement a également publié en 2014 un règlement pour réduire les émissions de GES visant les nouveaux véhicules moyens et lourds. Ce règlement vise les entreprises qui fabriquent et importent de nouveaux véhicules lourds routiers et leurs moteurs des années des modèles de 2014 destinés à la vente au Canada. Il s'aligne sur les normes des États-Unis pour conserver des règles de jeu équitables pour les fabricants nord-américains. (Environnement Canada, 2014).

Le gouvernement du Québec a mis en place en janvier 2018, la norme VZE (véhicule zéro émission) dont l'objectif est de stimuler les ventes de véhicules zéro émission et à faible émission. Pour se faire, un système de crédit a été mis en place obligeant les constructeurs vendant ou louant plus de 4 500 véhicules neufs en moyenne par année de mettre sur le marché québécois des VZE ou VFE. Pour chaque vente ou location d'un VZE reconnue par le ministère, le constructeur obtient des crédits lui permettant d'atteindre sa cible de crédits. L'objectif est de stimuler le marché québécois pour qu'il développe plus de modèles sobres en carbone. Lorsqu'un constructeur n'atteint pas sa cible de crédits, il doit payer des redevances. Au contraire, lorsqu'il possède un excédent de crédit, il peut les accumuler

ou les revendre. (MELCC, 2018b). La norme VZE découle du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques et du Plan d'action en électrification des transports 2015-2020, qui vise une cible de 100 000 véhicules branchables immatriculés d'ici 2020. Pour faciliter l'acquisition de véhicule électrique, le Québec s'est doté d'un programme de subvention : Roulez Vert. (MELCC, 2018b).

En 2016, la loi VZE vise l'augmentation du nombre de véhicules automobiles zéro émission au Québec afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre et autres polluants. (MELCC, 2018b). Elle favorise l'accessibilité des VZE et VFE pour les consommateurs québécois en réduisant le temps d'attente pour la livraison des VZE et VFE, en améliorant la gamme de choix, et en facilitant l'accès à des essais routiers de certains modèles. Le règlement permet au Québec de générer un revenu net de 7,4 M\$ pour l'année modèle 2019 et sur l'ensemble de la durée de vie du véhicule. La diminution des émissions polluantes permet d'éviter 0,1 M\$ en dommages sur la santé humaine. Pour les GES, cette mesure permet d'éviter 9,3 M\$. Les nouvelles installations de borne de recharge permettent de stimuler un nouveau secteur économique estimé à 2,5 M\$ en 2019. En termes de ratio avantage/coûts, cette mesure s'améliore dans le temps avec un ratio de 0,83 pour les modèles de 2019 jusqu'à 0,94 pour les modèles de 2025. Pour les modèles des années futures, la mesure pourrait devenir encore plus avantageuse en raison de la diminution des coûts de fabrication (batterie, moteurs, etc.) et de l'augmentation du prix de l'essence. (MDDELCC, 2017).

Depuis 2011, le Québec s'est engagé vers l'électrification des transports. L'utilisation d'électricité dans le secteur du transport permettra de réduire la consommation de carburant fossile et ainsi augmenter l'indépendance énergétique du Québec et réduire les émissions de carbones. Le Québec profite de l'avantage de sa source d'électricité verte. Le réseau d'Hydro-Québec permet déjà de répondre à la demande d'un million de véhicules électriques. Le Québec dispose d'une expertise de recherche qui permettra de soutenir cette transition. Il détient une expertise de niche dans le secteur de la fabrication d'équipement de transport terrestre, à savoir dans les autobus, les camions de collecte, les ambulances, etc. Pour former une main-d'œuvre de qualité, le Québec a réservé un budget pour lancer une attestation d'études collégiales en électrification des transports (AEC) et un programme universitaire de 2^e cycle de 15 crédits. (Ministère des Transports du Québec, 2015).

Pour répondre à l'objectif 17 du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques du gouvernement du Québec, qui porte sur la réduction de l'empreinte environnementale du transport routier des marchandises, le Québec a mis en place le programme Écocamionnage. Son financement provient du Fonds vert. Il permet aux entreprises, les institutions, les organismes et les personnes dont

l'établissement est situé au Québec de bénéficier d'une aide financière. Le programme se divise en cinq volets permettant de soutenir des projets d'acquisition, d'homologation, et de démonstration d'une technologie, d'amélioration de la logistique des entreprises de transport routier, et finalement d'acquisition d'un véhicule usagé hybride électrique, électrique ou fonctionnant avec un carburant de remplacement. (Ministère des Transports du Québec, 2018).

En 2019, le programme Transportez Vert a été lancé pour aider les entreprises, les municipalités et les organismes publics à mettre en place des actions de réduction de la consommation de carburant de leurs véhicules. Il se décompose en trois volets, à savoir un accompagnement pour la gestion de l'énergie sous la forme d'une aide financière pour inciter les gestionnaires de parc à réduire la consommation de leur véhicule. Le second volet consiste en une aide financière pour favoriser l'utilisation d'équipement améliorant l'efficacité énergétique dans le secteur du transport. Le troisième volet consiste à offrir une aide financière pour proposer une formation à l'écoconduite à ses employés. (Transition Énergétique Québec, 2019b).

Dans ses promesses électorales, M. Trudeau avait consolidé son engagement envers l'électrification des transports en fixant un objectif d'augmentation des bornes de recharge électrique. (Bellavance, 2019, 29 septembre). Le projet de loi numéro 184 souhaite favoriser le financement de borne de recharge électrique. Le Québec apparaît comme la province avec un ratio nombre de borne par véhicule le plus bas. Une augmentation du nombre de bornes électriques permettrait de conforter les futurs propriétaires de véhicules électriques, ce qui permettrait d'atteindre le fameux objectif de 100 000 VZE en 2030. (Roulez Électrique, 2018).

Le programme Transportez Vert propose une aide financière pour la conversion électrique des camions à hauteur de 50 % des dépenses admissibles. (Transition Énergétique Québec, 2019b). Sur le marché québécois, il existe deux compagnies qui proposent des camions tout électriques. La compagnie Ecotuned convertit les modèles de camion diesel ou essence en une motorisation électrique, et la compagnie NordResa propose quant à elle des camions légers entièrement électriques.

Les subventions offertes par le gouvernement du Canada et du Québec permettent de favoriser l'accès aux véhicules électriques. Ces subventions ont pour objectif principal de stimuler le marché pour rendre la technologie accessible au grand public. En tenant compte de la consommation moyenne d'une voiture à essence et de la distance moyenne parcourue par celle-ci sur une année, la voiture électrique permet d'éviter 3 tonnes de GES par an. En calculant l'annuité correspondant à une subvention pour l'acquisition d'un véhicule électrique (7 720 \$) et la mise en place d'une borne de recharge (575 \$), il est

possible d'estimer le coût d'évitement à l'utilisation à 1 560 \$/tonne de GES pour 10 ans. (Chassin et Tremblay, 2014). En 2018, le prix du carbone fluctue entre 10 et 35 \$ la tonne, alors que le coût social du carbone est estimé par certaines études à 167 \$ la tonne. (Bérubé, 2018).

1.3. Profil GES des municipalités

Dans cette partie, le lecteur trouvera un tableau synthèse des émissions GES des plus grandes municipalités du Québec (l'agglomération de Montréal, l'agglomération de Québec, la ville de Sherbrooke, la ville de Lévis, etc.). Des pistes d'actions pour la réduction des GES émis par le transport seront illustrées et documentées. Le tableau 1.1 permet d'illustrer les émissions des GES (corporatives et collectives) sur les territoires des municipalités québécoises.

Tableau 1.1 Émissions GES des municipalités québécoises.

Municipalité	Hab. (en milliers)	Émissions (ktCO ₂ eq)	Par hab. (tCO ₂ eq)	% transport	Cible 2020 (%)	Source
Montréal	1 782	11 730 (2014)	6,58	31 %	30 % par rapport à 1990	Ville de Montréal, 2018
Québec	542	4 180 (2011)	7,71	45 %	10 % par rapport à 1990	Agglomération de Québec, 2014
Laval	432	2 594 (2004)	5,94	59 %	-	Ville de Laval, 2004
Longueuil	243	790 (2009)	3,12	97 %	-	Ville de Longueuil, 2013a
Sherbrooke	166	558 (2016)	3,29	56 %	30 % par rapport à 2009	Ville de Sherbrooke, 2018
Lévis	141	2 458 (2009)	16,72	28 %	5,7 % par rapport à 2009	Ville de Lévis, 2014
Joliette	20	106 (2012)	5,15	95 %	14 % par rapport à 2012	Ville de Joliette, 2014 et Ville de Joliette, 2018

L'**Agglomération de Montréal** a mis en place un fonds énergie, un programme bonus-malus lors de l'acquisition de véhicule léger, une campagne de lutte contre la marche au ralenti des véhicules et Projet O-zone. Elle instaure l'utilisation d'essence à 5 % d'éthanol, et a mis en place une politique verte du matériel roulant : achat de véhicules émettant moins de GES. Pour ces employés municipaux, elle privilégie l'adoption des techniques d'écoconduite, et un suivi de différents critères de performance de son parc de véhicules. (Agglomération de Montréal, 2013). La conversion des véhicules lourds est une action souhaitée par l'agglomération. La conversion de carburant pour les véhicules lourds représente 690 camions au gaz naturel au Québec en 2017, et permet de réduire de 21,3 ktCO₂eq pour l'année 2015-2016 sur l'ensemble de la province. (Ville de Montréal, 2018b)

À l'**Agglomération de Québec**, la flotte d'autobus du réseau de transport en commun (RTC) et la gestion des matières résiduelles représentent plus de 80 % des émissions corporatives. Leur cible est très modeste, mais réaliste. Sur une réduction visée de 10 %, 4 % des objectifs de réductions toucheront la gestion des équipements motorisés : utilisation de biodiésel dans les véhicules municipaux et les autobus du RTC. Réduire la consommation annuelle du parc de véhicule a été chiffré à 2 %. Entre 2014 et 2020, elle suit l'obligation de remplacer annuellement 25 % des véhicules légers municipaux devenus désuets par des modèles hybrides, électriques ou à faible consommation. Elle instaure l'obligation d'installation de système afin de limiter la marche au ralenti des véhicules : implanter ce système à 5 % des véhicules municipaux et proposer des formations à l'écoconduite à ces employés. Pour le futur, elle souhaite accroître le nombre d'autobus hybrides au sein de la flotte RTC, et acquérir des systèmes de marche au ralenti des moteurs des autobus du RTC.

La **Ville de Longueuil** a fait le choix de privilégier l'achat de véhicule hybride et électrique pour les activités locales et d'agglomération, correspondant à 19 % des achats pour la période considérée. (Ville de Longueuil, 2013b). Elle fait également un suivi de la consommation de carburant de ces différents services. Cela a permis de faire ressortir les émissions dues à la collecte des matières résiduelles de la Ville de Longueuil en 2009 (8,9 ktCO₂eq), soit 1,1 % des émissions collectives. (Ville de Longueuil, 2013a).

La **Ville de Sherbrooke**, lors de la rédaction de son premier plan d'action contre les réchauffements climatiques avait identifié un objectif de réduction pour 2015 de 5 % comparativement à 2009. La ville avait déjà atteint la moitié de son objectif entre 2009 et 2016, avec une réduction de 2,6 % des émissions. En prenant les émissions par habitant, les émissions de GES par habitant ont été réduites de 9,6 %. (Ville de Sherbrooke, 2018). Pour atteindre l'objectif de 2030, il faudrait que les émissions

atteignent 388 ktCO₂eq. Les projections d'augmentation de la population proposées par l'Institut de la statistique du Québec et l'évolution du taux d'émissions de GES par habitant montrent que cet objectif ne pourra pas être atteint, puisque les émissions en 2026 approchent les 928 ktCO₂eq. Pour atteindre cette cible, il faudrait que le taux d'émissions par habitant soit inférieur à 1,37 tCO₂eq/hab., soit une réduction de 42 %. (Ville de Sherbrooke, 2018).

Au niveau des actions mises en place, elle a rédigé une politique sur la marche au ralenti des moteurs pour les véhicules municipaux. Elle privilégie le remplacement progressif de la flotte des véhicules selon les besoins (moins énergivores, hybrides, etc.). Elle a fait l'acquisition de deux véhicules hybrides. Elle a élaboré un système de suivi de la consommation de carburant en temps réel, et propose à ses employés des formations à l'écoconduite. Elle souhaite mettre en place un système d'arrêt moteur pour tous les véhicules et ajouter des critères achats écoresponsables à l'étape de préparation des devis d'achat/remplacement de véhicules. Elle cherche à remplacer progressivement le carburant diesel par du biodiesel de 3^e génération. Elle a aussi lancé une campagne incitative contre la marche au ralenti. (Ville de Sherbrooke, 2012).

La **Ville de Lévis** possède une forte émission due au secteur industriel 64 % des émissions, en ne considérant pas le secteur industriel, le taux d'émission par habitant descend à 6,27 tCO₂eq/hab. et le secteur du transport passe à 66 % (voir tableau 1.1). La ville souhaite offrir une formation en écoconduite à tout le personnel appelé à utiliser les équipements motorisés. Elle a mis en place une stratégie pour réduire la marche au ralenti des moteurs, et envisage un renouvellement progressif de la flotte par des véhicules moins énergivores. La stratégie de réduction de la consommation de carburant se base sur un suivi détaillé de la consommation par service. Pour se faire, elle a élaboré un tableau de bord de suivi de la consommation de carburant. Elle envisage par la suite l'ajout d'équipements pour réduire la consommation de carburants. L'objectif de réduction envisageable pour le secteur corporatif se chiffre à 793 tCO₂eq d'ici 2021. Pour les autobus, elle a commencé à faire le remplacement des systèmes de refroidissements hydrauliques par des systèmes électriques, et cherche à remplacer progressivement le diesel par du biodiesel. Pour le secteur de la collecte des matières résiduelles, elle va faire une révision du devis d'appel d'offres pour inclure des exigences particulières pour certains aspects de la collecte et à assouplir d'autres exigences afin de réduire la consommation de carburant des camions de collecte (clause touchant la réduction des GES). (Ville de Lévis, 2014).

La **Ville de Joliette** a comme particularité d'avoir une forte émission de GES due au transport. Dans son plan d'action pour la réduction des GES, la ville a identifié des actions pour limiter ses émissions

corporatives et collectives (qui représente plus de 95 % du bilan de 2012). (Ville de Joliette, 2012). Comme exemple, elle a proposé des formations à l'été 2015 pour sensibiliser les citoyens à l'utilisation des voies piétonnes et cyclables. Au niveau de la gestion des matières résiduelles, elle a optimisé ses collectes, notamment en réduisant la fréquence de collecte des déchets en hiver. Elle souhaite mettre en place une exigence d'utilisation de camion fonctionnant au biogaz pour sa collecte dans le prochain appel d'offres, mais pour des raisons légales elle a dû repousser cette initiative. Actuellement, la collecte est opérée par des camions fonctionnant au gaz naturel, ce qui permet de réduire annuellement 70 tCO₂eq. (Ville de Joliette, 2018).

2. LE TRANSPORT ET LA COLLECTE DES MATIÈRES RÉSIDUELLES AU QUÉBEC

La gestion des matières résiduelles a beaucoup évolué au fil du temps. Maintenant la collecte est pour la majorité des régions mécanisée. Cependant, la collecte au porte-à-porte comme les citoyens ont l'habitude de connaître ne concerne pas toutes les matières résiduelles produites. Certaines matières doivent être collectées d'une autre façon, comme l'apport volontaire. La collecte des matières résiduelles est un service municipal qui est souvent attribué à des compagnies privées pour alléger les tâches des employés municipaux. Même si les contrats sont rédigés dans un souci de respect budgétaire, certaines municipalités arrivent à intégrer des clauses environnementales favorisant la réduction des émissions de GES.

2.1. L'historique de la collecte

En 1883, Eugène Poubelle dépose un arrêté à la préfecture de Paris pour obliger les propriétaires d'immeubles à fournir des boîtes avec un couvercle à leurs locataires pour réceptionner les ordures ménagères. (Béguin, 2013). C'est l'origine du bac que nous connaissons aujourd'hui. La collecte des matières résiduelles s'est ensuite industrialisée en 1934 avec l'invention de la benne à compaction qui a permis d'augmenter les volumes admissibles lors d'une seule tournée. (Boiral, 2006).

En 1970, les valeurs de la récupération des matières se développent grâce à Normand Maurice. Il développe un système de récupération des matières recyclables par apport volontaire. Dix ans après, ce mouvement se concrétise et les municipalités québécoises commencent l'implantation d'une collecte des matières sélectives. En 1989, la première politique de gestion intégrée des déchets solides et la hiérarchie des 3-RV apparaissent et poussent les municipalités à suivre une règle de conduite uniforme sur l'ensemble du territoire. Un projet pilote de collecte des résidus organiques résidentiels est lancé à la Régie intermunicipale Argenteuil-Deux-Montagnes. (Chamard et Méthot, 2016). Ce projet a pour objectif d'expérimenter la collecte et la gestion des matières organiques. Loin d'être efficace à cette période, une collecte des résidus verts sera organisée par la suite. En 1997, le tout premier écocentre apparaît à Montréal, dans le quartier La Petite-Patrie. (Kachanova, 2014). Il permet aux citoyens d'apporter directement sur place leur encombrant et résidus de construction, rénovation et démolition (CRD). Dans les années 2000, à cause du manque de main-d'œuvre, la collecte des résidus domestiques se mécanise en incorporant un bras mécanisé à chaque camion ordure. La taille des bacs est aussi revue à la hausse pour réduire la fréquence de collecte et améliorer la saisie mécanisée. Les centres de tri réceptionnant les matières recyclables se modernisent permettant ainsi d'accueillir plus de volume. En 2009, le gouvernement du Québec lance le programme traitement de matières organiques par

biométhanisation et compostage. Ce qui va inciter les municipalités québécoises à mettre en place des installations de traitement des matières organiques. Le but est de retirer les matières organiques du bac des résidus ultimes. Cela se traduit souvent par l'ajout d'une nouvelle collecte. (Chamard et Méthot, 2016). D'après la politique québécoise de gestion des matières résiduelles de 2011-2015, les matières organiques devaient être bannies de l'enfouissement en 2020. Cette mesure a eu pour but de stimuler les municipalités dans leur mise en œuvre d'une collecte des matières organiques efficaces, mais n'est pour le moment que verbale. (Gouvernement du Québec, 2011).

2.2. Les types de collecte

Cette section permettra de faire un retour sur les matières collectées au Québec et les technologies utilisées pour réaliser cette collecte. Une attention particulière sera mise sur les matières particulières qui n'entrent pas dans la collecte municipale habituelle (hors des bacs de déchets, de matières recyclables, et de compost). Elle permettra au lecteur de comprendre les responsabilités des municipalités envers la collecte des matières résiduelles.

Au Québec, chaque MRC doit rédiger un Plan de gestion des matières résiduelles (PGMR). Il n'y a pas de règles uniformes pour l'ensemble des municipalités, seulement des objectifs à atteindre. Ces objectifs sont énoncés par le gouvernement. (Gouvernement du Québec, 2011). En fonction des matières, les modes de gestion et de collecte varient. Il existe deux types de collecte : la collecte porte-à-porte et la collecte par apport volontaire.

La collecte porte-à-porte correspond à un circuit prédéfini et fixe, il comprend le déplacement de camions aux domiciles pour récupérer les matières résiduelles remises par les citoyens. Aucun déplacement de la part du citoyen, il doit simplement réaliser un tri à son domicile et déposer ses matières dans les bons bacs. (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie [ADEME], 2018)

Il existe deux types de collecte porte-à-porte. L'un sur base régulière avec le même circuit et une identification de la fréquence de passage du camion ordures. Puis, les collectes spécialisées effectuées sur appel ou quelques fois durant l'année. Avant une collecte, les citoyens doivent disposer leurs matières dans les bons récipients. Généralement, ils doivent effectuer un tri entre les matières recyclables, organiques et les déchets. Les matières sont pré-collectées grâce à des bacs. Lors de la circulation des camions ordures, ils récupèrent les bacs pour les vider dans leur benne. Pour optimiser leur capacité et les circuits, les camions ordures sont équipés d'un système de tassement. Les véhicules de collecte fonctionnent généralement au diesel, mais des énergies alternatives commencent à faire

leur apparition (gaz naturel, hybride, électrique) pour limiter les émissions polluantes et le bruit. (ADEME, 2018). Les collectes porte-à-porte sur base régulière sont le plus souvent octroyées à des compagnies externes via des appels d'offres publiques. (Ville de Montréal, 2007).

Il existe des collectes porte-à-porte spécialisées, notamment pour la collecte des sapins des fêtes de fin d'année, ou pour la collecte des encombrants, ou même pour la collecte des matières dangereuses directement chez le citoyen. Ces collectes sont le plus souvent opérationnalisées par le service interne de la municipalité. Elles peuvent être réalisés par des camions ordures avec un système de tassement ou de simple camion. Les citoyens reçoivent un horaire de passage ou peuvent faire appel directement à la municipalité. (Équiterre, 2008).

Pour les matériaux plus volumineux et qui ne sont pas autorisés dans les bacs de collecte ou qui ne font pas l'objet d'une collecte spécialisée, les citoyens ont l'option de la collecte par apport volontaire. Le citoyen doit se déplacer vers un point de dépôt pouvant accueillir les matières. Les matières sont ensuite recueillies et transportées vers un centre de tri, ou vers le centre de traitement adapté. (Recyc-Québec, 2006).

Ces points de dépôt s'organisent le plus souvent sous la forme d'un écocentre. C'est un lieu de récupération des matières résiduelles pour les résidents qui souhaitent se départir de certains produits, matières et matériaux. Les écocentres acceptent quasiment tous types de matières : matériaux de construction, rénovation et de démolition (CRD), matériel électronique, pot de peinture, etc. Pour la plupart, ils fonctionnent selon le principe du pollueur-payeur. Plus les volumes apportés sont élevés, plus la personne responsable de ce dépôt devra payer. C'est le cas notamment pour les CRD. (Ville de Québec, 2020).

La collecte sélective peut aussi être opérée sous la forme d'apport volontaire. Des conteneurs peuvent être mis à la disposition des citoyens. Ces conteneurs sont placés à des endroits stratégiques permettant d'augmenter l'efficacité de la récupération. Ils peuvent être collectés à une fréquence donnée ou alors sur appel quand le conteneur commence à être rempli. (Recyc-Québec, 2006).

Certains récipients peuvent être consignés. C'est le cas pour les bouteilles en verre de bière ainsi que les canettes en aluminium. Dans ce cas, les consommateurs payent une consigne sur chaque contenant. Après consommation, ils doivent rapporter le contenant au détaillant qui s'occupe d'en faire le tri et de les envoyer vers le bon centre de traitement. (Recyc-Québec, 2018).

Certaines matières, produits et équipements sont sous la responsabilité élargie des producteurs (REP). Ce système transfère la responsabilité de la gestion des matières résiduelles générées par la consommation d'un produit à l'entreprise qui a conçu et mis sur le marché ce produit. Ils couvrent les produits pouvant contenir des matières dangereuses pour l'environnement et la santé humaine, à savoir les huiles, antigels, liquides de refroidissement, les lampes au mercure, les peintures, les piles et les batteries, ainsi que les produits électroniques. (Recyc-Québec, 2019a et Recyc-Québec, 2019b). Ces produits sont souvent collectés par apport volontaire dans un point de dépôt ou directement à l'écocentre.

Depuis la fin de l'année 2019, le gouvernement du Québec a élargi cette responsabilité aux électroménagers pouvant contenir des fluides frigorigènes comme les hydrofluorocarbures (HFC) ou les chlorofluorocarbure (CFC). Ces fluides ayant un fort pouvoir de réchauffement climatique doivent être collectés et traités. (Réseau Environnement, 2019). Il existe des compagnies qui s'occupent déjà de recycler les appareils de réfrigération. Elles proposent un service clé en main aux municipalités et MRC en s'occupant de la collecte et du traitement. (PureSphera, 2016).

2.3. Fonctionnement des appels d'offres et des contrats de collecte au Québec

Au XXe siècle, les gouvernements ont pendant longtemps fait appel à une augmentation des impôts pour financer la croissance du secteur public. Il est alors apparu une contradiction entre l'augmentation de la demande de services municipaux par les citoyens et la contestation de l'augmentation des impôts pour financer ses services. Les municipalités sont le palier gouvernemental qui offre le plus de service avec le moins de budgets. Pour réduire les dépenses et proposer des services correspondant à la demande, les gestionnaires des municipalités ont cherché des nouvelles méthodes pour fournir ses services. La sous-traitance, la privatisation et la compétition public-privé sont apparues alors comme des solutions innovantes. Une solution pour rendre le secteur des services municipaux plus efficace, était de privatiser certains services afin de stimuler certaines formes de compétition. (Coderre-LaPalme, 2014).

La collecte des matières résiduelles est un service municipal qui est souvent délégué au secteur privé par des appels d'offres publics. Sur le système électronique d'appel d'offres du gouvernement du Québec (SEAO), il est possible de voir les appels d'offres publics en cours et déjà pourvus. Pour la collecte des matières résiduelles, la majorité des appels d'offres se ressemblent. Ils y intègrent les clauses de bases pour un contrat de collecte à savoir la durée du contrat, la gestion des non-conformités, l'ajustement de prix, etc. (Le système électronique d'appel d'offres du gouvernement du Québec [SEAO], 2019)

Généralement, pour la collecte, l'ajustement de prix se fait par le calcul des prix unitaires par logement et à cela s'ajoutent les coûts des carburants. Certains contrats définissent une clause d'ajustement pour négocier ce prix chaque année. Cela permet d'ajuster le prix unitaire par logement en fonction de l'écart de poids des déchets collectés durant l'année précédente et celui de l'année de la signature du contrat. (Équiterre, 2008).

Dans la majorité des contrats, la mesure de la performance de l'entreprise de collecte se fait via les rapports de tonnage fournis par l'entreprise, puis par des inspections, par les indices de propreté, par les plaintes rapportées et le suivi d'avis de défaut. (Équiterre, 2008)

Depuis peu, il existe au Québec des compagnies qui offrent une expertise dans la rédaction des contrats de collecte. C'est le cas pour Éco Entreprise Québec (EEQ) qui conseille les municipalités sur la collecte des matières recyclables. Dans cette démarche, EEQ réalise une veille des documents d'appels d'offres affichés sur le système SEAO, en retire les bons coups et les partage avec les municipalités lors des ateliers du Chantier des meilleures pratiques ou sous forme de fiches. (A. Verner, courriel 7 janvier 2020). Pour la collecte des matières organiques, Recyc-Québec a mis en place un rapport des bonnes pratiques d'appels d'offres. Ce rapport compile des recommandations de clauses à intégrer ainsi que leurs justifications. (Recyc-Québec, 2016).

Les municipalités sont fortement incitées par le programme Climat-Municipalité afin de produire un bilan des émissions de gaz à effet de serre et de mettre en place des actions (MELCC, 2018d). Ainsi, elles ont un intérêt à ce que le prestataire réduise sa consommation de carburant et ainsi ses émissions de GES. Les clauses environnementales les plus récurrentes pour la collecte des matières recyclables concernent l'utilisation de carburants alternatifs, la marche au ralenti des véhicules, et la formation des chauffeurs à l'écoconduite. Les municipalités peuvent exiger des prestataires d'équiper l'un des véhicules de la collecte d'un système de réduction de la consommation, par exemple la technologie Stop and Start qui permet de couper le moteur lorsque le véhicule est à l'arrêt. (A. Verner, courriel 7 janvier 2020).

Dans le contexte d'aujourd'hui, le processus d'appel d'offres se base sur le plus bas soumissionnaire : la majorité ne tient uniquement compte que des coûts. Ce qui a tendance à défavoriser les véhicules avec les moindres impacts sur l'environnement. La nécessité d'avoir au moins trois soumissionnaires limite l'usage de technologie innovante : cela complexifie et ralentit les processus d'intégrations de clauses environnementales justes pour les soumissionnaires. De plus, il est difficile pour les nouvelles technologies de répondre aux garanties de longévité prévue dans certains contrats (notamment au

niveau de la batterie). Pour une électrification complète d'un service, cela entraîne des contraintes reliées à la recharge et aux changements dans les opérations qui peuvent rendre un soumissionnaire moins compétitif économiquement, c'est notamment le cas pour les appels d'offres mobilité (exemple pour les autobus). (Propulsion Québec, 2019b).

3. LES RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES DONT DISPOSE LE QUÉBEC

Le Québec repose sur un grand potentiel pétrolier, que ce soit du pétrole pur ou du gaz naturel, la ressource est disponible dans le sous-sol québécois. Par ailleurs, d'autres innovations qui prônent une économie circulaire visent à utiliser les déchets produits par les Québécois pour en faire des biocarburants. Pour rester dans l'économie circulaire, la production de gaz naturel renouvelable sera en forte croissance d'ici les années futures et pourra certainement favoriser la réduction des émissions de GES. Finalement, le Québec dispose d'une ressource incroyable d'énergie verte : l'hydroélectricité.

3.1. Les hydrocarbures et le potentiel des biocarburants

Les hydrocarbures représentent plus de la moitié du bilan énergétique du Québec. Son utilisation se résume principalement au secteur du transport. (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles [MERN], 2020c). Le Québec cible en 2023 une réduction de 5 % de la consommation d'hydrocarbures en prenant pour référence l'année 2013. (Whitmore et Pineau, 2018).

Les hydrocarbures consommés au Québec sont principalement importés et transportés par pipelines (97 % des hydrocarbures). (Allard, Laplante, et Deger, 2015). Les industries de raffinage présentes à Lévis et à Montréal permettent la transformation de 402 000 barils par jour. (Whitmore et Pineau, 2018). Le transport des hydrocarbures est soumis à la réglementation fédérale de l'Office national de l'énergie (ONE). L'ensemble du Canada possède un réseau de 825 000 km. Les accidents de pipeline y sont peu fréquents. Pour l'ensemble du réseau, il arrive en moyenne moins de 20 accidents par an. (Allard, Laplante, et Deger, 2015). Par ailleurs, le Québec repose sur un sous-sol riche en gaz et en pétrole. Le rapport de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS) publié en 2015 démontre que les sous-sols contiennent plus de 7,8 km³ de gaz et 150 milliards de barils de pétrole. La grande majorité de ces réserves se situe dans les bassins sédimentaires du sud du Québec et la région des basses-terres du Saint-Laurent. (Institut national de la recherche scientifique [INRS], 2015).

3.1.1 Biocarburant

La production de biocarburant peut être réalisée à base de plantes alimentaires (maïs, blé, canola, soya, etc.), ce sont les biocarburants de 1^{re} génération. Le Québec produit environ 175 millions de litres d'éthanol de 1^{re} génération. Cependant, pour des raisons éthiques, en cherchant à utiliser des matières premières non comestibles, le Québec a su innover dans la production de biocarburant. Maintenant, il est considéré comme chef de file dans le domaine de l'éthanol cellulosique. Cette technologie permet de produire des biocarburants à partir des matières résiduelles urbaines, forestières et agricoles.

(MERN, 2020a). Au Québec, la consommation de biocarburants représente 475 millions de litres par année pour l'éthanol (soit presque 5 % de l'essence) et 9 millions de litres pour le biodiésel. (MERN, 2019a).

Pour respecter ses engagements de réduction des émissions de GES, le gouvernement du Canada a mis en place des mesures d'intégration de biocarburant dans les carburants utilisés dans le secteur du transport (essence et diésel). Ainsi depuis juillet 2011, le Québec doit mettre en vente de l'essence avec au moins 5 % d'éthanol. Pour le diésel, l'intégration du biodiésel est fixée à 2 %, mais cet objectif n'a été atteint en 2019 (d'après le rapport Navius « *Biofuels in Canada* », le Québec serait à 0,2 % de biodiésel dans son diésel). (MERN, 2019a). Afin de répondre à l'exigence, le Québec a fait l'importation de 75 millions de litres d'éthanol. (MERN, 2020a).

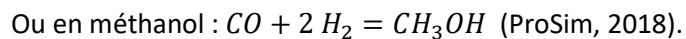
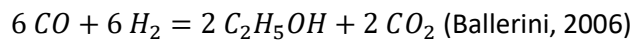
Selon la Politique énergétique 2030, le Québec doit augmenter de 25 % sa production d'énergie via des sources renouvelables et de 50 % sa production de bioénergie (biogaz, biodiésel, éthanol, etc.). (MERN, 2019b). L'article 18 du projet de loi 106 vise à établir un règlement qui fixe des normes d'intégrations de carburants renouvelables à l'essence et au diésel, jusqu'à 10 % en 2030. Pour favoriser le développement de production de biocarburant à partir de déchet, le règlement pourrait adopter le même principe de fonctionnement européen de double importance. C'est-à-dire que chaque biocarburant de nouvelle génération (produit à partir de matières résiduelles) comptera le double dans le calcul de l'obligation du contenu minimum. (Conseil des entreprises en technologies environnementales du Québec [CETEQ], 2016). L'atteinte de ces objectifs nécessitera des investissements pour l'ensemble des entreprises du secteur de l'ordre de 110 M\$, et des coûts administratifs estimés à 140 000 \$. (MERN, 2019a).

3.1.2 Déchet

Au Québec, le secteur des déchets produisait en 2016, 4,9 MtCO₂eq, soit 6,2 % des émissions de GES totaux du Québec. En 2015, la quantité de matière résiduelle enfouie ou incinérée par habitant est de 685 kg, avec plus de 41 % de matières organiques. (Recyc-Québec, 2019). Enerkem a mis en place un procédé industriel de conversion des déchets en biocarburant. La transformation de 100 000 tonnes métriques de déchets non recyclables permet de produire 38 millions de litres de biocarburants. (Enerkem, 2013). Pour atteindre les besoins actuels en éthanol, il faudrait convertir 1 250 000 tonnes métriques de déchets, soit l'équivalent d'une ville de 1,8 million d'habitants. La production d'éthanol à partir de déchet se fait dans deux usines au Québec, l'une à Sherbrooke qui sert de pilote et l'autre à Westbury comme usine de démonstration. (Enerkem, 2013). Une usine est en construction à Varennes

et aura une capacité de production de 115 000 tonnes de déchets par année, soit l'équivalent d'une ville de 168 000 habitants. (Normand, 2017, 9 septembre).

Enerkem utilise un procédé thermochimique pour transformer les déchets résidentiels en énergie. Cela commence par un tri des déchets pour récupérer les matériaux avec des liaisons carbone à savoir les plastiques, bois et tissus. Les résidus organiques sont envoyés vers une plateforme de compostage. Les autres matériaux inertes du bac noir sont triés et envoyés vers leur centre de traitement respectif. Les résidus conservés sont broyés puis chauffés dans un environnement à faible teneur en oxygène : c'est la gazéification. Cela permet de libérer le carbone et l'hydrogène. Il se forme alors un Syngaz qui est un mélange de monoxyde de carbone, de dioxyde de carbone, et d'hydrogène. (Québec Science, 2019). La synthèse catalytique permet de transformer le Syngaz en éthanol :



La production d'éthanol à partir des déchets est une solution immédiate au changement climatique, puisque les infrastructures sont déjà existantes (station essence et voiture), et que le carburant est produit localement. Cette solution s'inscrit dans les principes de l'économie circulaire en évitant l'enfouissement et s'appuie sur une ressource abondante et gratuite. (Enerkem, 2013). L'éthanol suit le prix de l'essence ordinaire, en janvier 2020 l'essence avec 5 % d'éthanol est affichée à 1,19 \$/l à la pompe. (Régie de l'énergie, 2020).

3.1.3 Biodiésel

Le biodiésel est un biocarburant produit à partir d'huiles végétales ou d'huile de friture recyclée ou de gras d'animal. (MERN, 2020a). Au Québec, il existe une usine de production de biodiésel à partir d'huile et de graisse. Lancée en 2005, la société Québec Biodiésel permet la production de 45 millions de litres par année. Elle s'assure de la collecte des huiles chez les producteurs. Son procédé de transformation permet de fabriquer du biodiésel et de la glycérine. La glycérine est un coproduit valorisable dans l'industrie. (Rothsay, 2019). En 2019, un projet de transformation des résidus forestiers en biocarburant est en construction pour une mise en service en 2023. Ce projet nommé Bioénergie La Tuque permettra de produire 200 millions de litres de biodiésel par an, ce qui correspond à 4,3 % de la consommation de diésel pour le transport. (Réseau des ingénieurs du Québec, 2017)

Les véhicules présents actuellement sur les routes du Québec conviennent au biodiésel. Les fabricants garantissent le réservoir et les moteurs jusqu'à 5 % de biodiésel. Lors des premières utilisations, le biodiésel par son effet solvant nettoie le réservoir, les conduites d'alimentation et tout le système d'alimentation, ce qui nécessite de remplacer deux à trois fois les filtres. Puis par la suite, le mélange avec 5 % de biodiésel n'aura plus aucun impact. En hiver, un mélange supérieur à 5 % de biodiésel demande des méthodes de manipulation et de rangement appropriées pour l'empêcher de devenir gélatineux. (MERN, 2019b). Le biodiésel suit le prix du diesel ordinaire, en janvier 2020 le diesel est affiché à 1,31 \$/l à la pompe. (Régie de l'énergie, 2020).

Les biocarburants permettent de limiter les impacts de l'utilisation des hydrocarbures. Cependant, il existe une disparité dans les bilans carbone des différents biocarburants. Les analyses de cycle de vie dépendent de la technologie employée, des sites et des systèmes de production. Il est possible que l'utilisation de biocarburants produise plus d'émissions de GES que les carburants fossiles. (FAO, 2008). Les analyses de cycle de vie de l'éthanol de 1^{re} génération produit à base de plante montrent des réductions de 30 à 60 % des émissions. (Paquet, 2010). D'après l'analyse de l'Association canadienne de combustibles renouvelable (ACCR), le biodiésel permet une réduction jusqu'à un taux de 99 % par rapport au carburant fossile et de 62 % pour l'éthanol. (Association Canadienne des Carburants Renouvelables [ACCR], 2010 et KD Communication, 2011).

3.2. Le gaz naturel

Le gaz naturel est un hydrocarbure principalement composé de méthane (CH₄). Il s'est formé par la décomposition lente des résidus organiques dans le sous-sol. (MERN, 2020b). Il émet moins de GES que l'essence ou le mazout et possède une efficacité énergétique plus élevée, ce qui fait de lui une énergie à fort potentiel pour la lutte contre le réchauffement climatique. (MERN, 2020b, et Darley, 2004 et IEA, 2009). Au Québec, le gaz naturel est importé de l'Ouest canadien et des États-Unis. Transporté par des gazoducs à partir de l'Alberta, le gaz naturel est distribué via un réseau interurbain de plus de 10 000 km. (MERN, 2020b et Énergir, 2020).

Comme pour les carburants fossiles, le Québec dispose de gaz naturel dans son sous-sol, principalement dans la vallée du Saint-Laurent et dans le golfe. (Duhamel, 2010 et Castonguay et al., 2009). Cependant, l'extraction du gaz naturel peut avoir des effets nocifs sur la santé humaine. Les puits de gaz naturel et les usines de traitement peuvent rejeter des sulfures d'hydrogènes et être une source de benzène, ce sont des substances dangereuses et cancérigènes pour l'être humain. (Fondation David Suzuki, 2011).

Depuis mars 2019, les distributeurs de gaz naturel doivent mélanger du gaz naturel renouvelable (GNR) dans son réseau de distribution. (MERN, 2020b). Le gouvernement du Canada a fixé une cible de 5 % de GNR mélangé au gaz naturel d'ici 2025 et 10 % d'ici 2030. (O'Meara, 2016). Cette mesure a pour but de stimuler les marchés de production de GNR. Au Québec, le biogaz (GNR) est produit dans les lieux d'enfouissement techniques (LET) et les usines de biométhanisation. La législation québécoise oblige les LET à capter le méthane. Il est possible alors de le purifier pour en faire du biogaz et l'injecter sur le réseau de distribution ou bien de le brûler pour le transformer en chaleur ou en électricité. (MERN, 2020a). Depuis la mise en place du programme de soutien financier pour le traitement des matières organiques, les municipalités et MRC sont encouragées à mettre en place une collecte des résidus organiques pour les retirer des sites d'enfouissement. L'option de la biométhanisation de ces résidus est intéressante pour les municipalités et MRC ayant de gros volumes, puisqu'elle permet de supprimer les GES de l'enfouissement et de produire du biogaz qui va être acheté par le distributeur. (Entreprise Québec, 2019). En effet, en 2020, les distributeurs québécois à savoir Énergir, doivent injecter 1 % de GNR à son gaz naturel distribué. (MERN, 2020a). Il existe quatre installations de production de biogaz au Québec, dont deux sites de biométhanisation (Saint-Hyacinthe et Rivière-du-Loup) et deux sites d'enfouissements. (Énergir, 2019a).

3.2.1 Biométhanisation

La biométhanisation est opérée d'une façon industrielle depuis le début des années 80. La production de méthane permet d'assurer une autoconsommation pour l'usine et le surplus est injecté sur le réseau. Le biogaz a la particularité d'être produit localement par digestion de la biomasse par des bactéries en mode anaérobies, sans présence d'oxygène. Une usine de biométhanisation permet de traiter les boues provenant des égouts, des déchets organiques des résidences et industries, du fumier et des déchets agricoles. (Cornelissen, 2010 et MERN, 2020). La production de biogaz entre dans les principes de l'économie circulaire. Les déchets organiques peuvent être collectés par des véhicules roulant au biogaz et l'usine permet d'alimenter ces véhicules. Le biogaz comme le gaz naturel a une plus grande efficacité que les carburants fossiles, 1 hectare de biomasse converti en biogaz permet de rouler jusqu'à 49 000 km. La combustion du biogaz a une faible émission de GES, ce qui lui permet de faire rouler un véhicule jusqu'à 20 fois plus loin que le diesel conventionnel pour la même émission. (MERN, 2020b, et Darley, 2004 et IEA, 2009 et Cornelissen, 2010).

Le biométhaniseur de Saint-Hyacinthe permet de produire jusqu'à 16 millions de mètres cubes de gaz par année. La ville s'appuie sur les résidus organiques de 53 000 habitants et sur les municipalités

voisines et la forte présence d'industries agroalimentaires de la région pour atteindre le volume nécessaire à la rentabilité de l'usine. (O'Meara, 2016). La collecte se fait en valorisant le biogaz produit ce qui permet de réduire les coûts. (O'Meara, 2016).

Le biogaz a un fort potentiel à l'horizon 2030. Énergir estime que la majeure partie de son gaz distribué à travers son réseau sera du biogaz. Cela permettra d'éviter 7,2 millions de tonnes de CO₂eq annuellement, de créer 15 000 emplois/an, et de générer un revenu de 256 M\$ annuels pour les gouvernements. (Énergir, 2019b). Il existe deux générations de production de biogaz, la première consiste à exploiter le potentiel des bactéries aérobies via la biométhanisation des résidus organiques et le captage de biogaz dans les LET. La biométhanisation pourrait générer jusqu'à 20 millions de m³ de GNR par année. (Énergir, 2019b) La seconde consiste à faire une pyrolyse des résidus forestiers. Énergir estime que 80 % du GNR produit en 2030 sera d'origine forestière. La commercialisation de ce nouveau procédé est prévue pour 2025. (Énergir, 2019b).

3.3. L'hydroélectricité du Québec : un avantage concurrentiel

Le Québec possède un parc hydraulique de 62 centrales d'une capacité de 36 gigawatts (GW), lui permettant de produire jusqu'à 165 Téra wattheures (TWh) par année. Il faut savoir 1 TWh permet de répondre au besoin de 54 000 ménages. (Hydro-Québec, 2019d). Le réseau d'Hydro-Québec est le plus vaste d'Amérique du Nord avec plus de 34 272 km de lignes. Son réseau est interconnecté avec le Nouveau-Brunswick, l'Ontario, New-York et la Nouvelle-Angleterre. Sa capacité d'exportation est supérieure à celle d'importation (respectivement 8 212 MW et 5 975 MW). (Hydro-Québec, 2018c).

Hydro-Québec estime que la consommation d'électricité sur la période de 2019-2029 subira une croissance de +12,5 TWh, dont 2,3 TWh proviendront du développement des véhicules électriques. (Hydro-Québec, 2019d). Hydro-Québec possède les infrastructures pour produire et distribuer l'énergie demandée en 2029, cependant le plus grand défi est la gestion des pics d'appel de puissance en hiver. En effet, plus de 80 % des ménages se chauffent à l'électricité, ce qui produit de fortes demandes lors des périodes de pointe (entre 6 et 9h, et 16 et 20h). Lors de ces périodes, le réseau doit alimenter une puissance de 38 GW ce qui l'oblige parfois à importer de l'énergie d'autres régions (États-Unis et Ontario). (Hydro-Québec, 2019d). Pour lutter contre les pics, Hydro-Québec mise sur la sensibilisation des usagers aux meilleures pratiques, sur des appuis financiers et sur l'accompagnement des clients en gestion de l'énergie. À partir de 2019, des tarifs dynamiques sous forme de nouvelles offres permettront aux clients de faire des économies lorsqu'ils réduiront leur consommation d'électricité à la demande du distributeur, l'hiver, pendant les périodes de pointe. (Hydro-Québec, 2019d). Ces mesures ont pour but

de favoriser l'efficacité énergétique et l'effacement, ce qui permettra de réduire les besoins énergétiques de 5,6 TWh d'ici 2029. (Hydro-Québec, 2019d). La filiale Hilo d'Hydro-Québec est l'un des résultats de ces mesures d'efficacité énergétique. Elle gère de manière intelligente l'effacement de la consommation lors des périodes de pointe. Elle permettrait de réduire de plus de 600 MW d'ici 2028. (Hydro-Québec, 2019d).

Afin d'atteindre les objectifs de réduction de GES des Accords de Paris, le Canada doit se tourner de plus en plus vers la production d'énergie renouvelable. Pour augmenter sa capacité de production, le Québec peut se tourner vers les énergies renouvelables intermittentes comme le solaire et l'éolien. En effet, l'hydroélectricité à l'avantage de pouvoir combler la variabilité de ces sources d'énergie. Le Québec possède 27 grands réservoirs d'une capacité maximale de stockage de 176 TWh. (Séguin, 2017 et Hydro-Québec, 2020). Il serait alors avantageux de pouvoir prévoir les besoins énergétiques et les productions futures de ces sources d'énergie intermittentes afin de stocker ou de distribuer l'énergie de ces grands réservoirs efficacement. Avec le développement des véhicules électriques, il serait possible de stocker de l'énergie dans des points de stockage géographiquement éloignés. C'est le projet SmartDESC (smart Distribution Energy Storage Controller). Il envisage de stocker de l'énergie à partir de l'analyse des prédictions de la production d'énergie à court terme, des prédictions météorologiques, et des prédictions de consommation électrique des clients raccordés au réseau électrique. (Sirois, Bourdel, et Malhamé, 2017).

Hydro-Québec possède une grande expertise dans la production et la distribution d'électricité. Les consommateurs d'électricité au Québec ont la chance de profiter d'un réseau efficace et fiable. En effet, Hydro-Québec est en amélioration continue de ces services. L'institut de la recherche d'Hydro-Québec (IREQ) a mis en place une solution novatrice pour détecter et résoudre les pannes d'électricité avant qu'elles ne se produisent. (Hydro-Québec, 2018b). De plus, Hydro-Québec développe des technologies innovantes pour les batteries et les moteurs de véhicules électriques. Il développe actuellement un réseau de bornes de recharge, via le circuit électrique. En 2015, environ 2 % de l'électricité consommée au Québec est utilisée comme carburant pour des millions de véhicules électriques. (Hydro-Québec, 2019b). Le Circuit électrique est un réseau de bornes de recharge qui compte 2 354 bornes de recharge en service, dont 290 bornes rapides. À date du 30 novembre 2019, le circuit a permis la recharge de 64 935 véhicules électriques, dont 32 532 véhicules 100 % électriques. Cela correspond à une distance parcourue de plus de 80 millions de km. (Le Circuit électrique, 2019). Les utilisateurs des bornes

bénéficient d'un service assistance téléphonique 24 heures sur 24 et d'une application leur permettant de repérer les bornes qui sont à proximité. (Hydro-Québec, 2018a)

Hydro-Québec s'engage entièrement dans l'électrification des transports en créant une filiale entièrement dédiée à l'industrialisation et la commercialisation en grande série de systèmes de motorisation électrique. Sa filiale appelée TM4 propose des équipements qui sont actuellement équipés dans les autobus. Elle propose des systèmes de motorisation pour les véhicules légers et lourds. (Hydro-Québec, 2019c et Dana TM4, 2020).

En respectant le facteur de puissance et sans aucune pénalité, il est estimé que l'électricité fournie par Hydro-Québec a un coût de 0,1079 \$/kWh (taxes incluses, au tarif en vigueur le 1er avril 2019). (Hydro-Québec, 2019a). Pour un véhicule utilitaire de consommation moyenne de 8 l/100km, le passage à l'électrique permet de faire des économies jusqu'à 8 \$ pour 100 km. (Roulons Electrique, 2020).

Les émissions de GES pour 1 kWh produit d'hydroélectricité se chiffrent à 6 gCO₂eq/kWh (fils de l'eau) et 17 gCO₂eq/kWh (réservoir). Les réservoirs émettent plus de GES puisque la mise en eau de ces réservoirs provoque une décomposition anaérobie de la matière organique inondée. Ces émissions de GES vont diminuer progressivement au cours des dix années suivantes. Au Québec, l'électricité produite (dont 97 % à base d'énergie renouvelable) émet 22 gCO₂eq/kWh. (Hydro-Québec, 2015). L'électricité produite au Québec est parmi les approvisionnements électriques ayant les plus faibles impacts potentiels sur la santé humaine et sur la qualité des écosystèmes. (Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services [CIRAIG], 2014).

4. PORTRAIT DES TECHNOLOGIES UTILISÉES POUR LA COLLECTE AU QUÉBEC

La collecte des matières au Québec est principalement exécutée par des compagnies privées qui utilisent une flotte de camion au diésel. Cependant, il existe quelques compagnies qui se sont tournées vers l'utilisation de carburant plus vert comme le biodiésel ou encore le gaz naturel. La technologie du camion tout électrique est encore récente et peu éprouvée au Québec, mais son homologue au gaz naturel a déjà montré son efficacité vis-à-vis de la réduction des GES et des frais d'exploitation. Cette section permettra de documenter les technologies utilisées pour la collecte des matières résiduelles du Québec ainsi le lecteur aura une vision d'ensemble sur les technologies utilisées par les compagnies privées.

4.1. Le cas par défaut : l'utilisation du diésel

Au Québec, il existe une compagnie de fabrication et d'assemblage de camion diésel, c'est le groupe Labrie Enviroquip. Avec une production annuelle de 1 200 camions, elle est considérée comme la 3^e plus importante d'Amérique du Nord. Située à Lévis, elle emploie plus de 450 salariés. Par ailleurs, son marché principal reste les États-Unis où 7 véhicules sur 10 construits y sont exportés. (Leduc, 2016, 27 juin).

La collecte des matières résiduelles est l'un des secteurs du transport le moins efficace énergétiquement. En effet, un circuit de collecte possède la particularité d'avoir un grand nombre d'arrêts et de démarrages. Par exemple, un circuit de collecte à Victoriaville d'environ 1 000 portes comporte plus de 1 200 arrêts/démarrages. (Arsenault, 2008). Même si les circuits sont généralement optimisés, la consommation en carburant des véhicules de collecte est élevée. De plus, le camion se charge au fur et à mesure de la collecte ce qui accroît l'énergie demandée pour les futurs arrêts/démarrages. (Association québécoise des transports [AQTR], 2016). Le rendement énergétique d'un camion de collecte au diésel est estimé à 10 %. (ADEME, s. d.). La consommation en carburant d'un camion de collecte est variable et dépend de son utilisation. Un circuit court avec de nombreux arrêts (circuit urbain) aura une consommation au 100 km plus élevée qu'un circuit où les arrêts seront espacés (circuit rural). La consommation de carburant peut varier de 50 l/100km à 140 l/100km tout dépendamment du type de circuit, du camion et de la conduite du chauffeur. (Voir annexe 2. Donnée de consommation de différentes flottes de camion de collecte au diésel). La vitesse de collecte d'un camion est estimée en moyenne à 15 km/h. Elle prend en compte les multiples arrêts/démarrages. (Di Maria et Miracle, 2013).

La mise en place d'une collecte intelligente pourrait permettre de réduire la consommation de carburant. Une collecte intelligente est une collecte où chaque bac est équipé d'une puce électronique. À chaque levée d'un bac, une donnée remonte sur la plateforme de gestion. À partir de l'analyse de ces données, il est possible d'optimiser les circuits pour réduire les distances parcourues et le nombre d'arrêts/démarrages. Le citoyen a alors comme consigne de mettre en bordure de rue son bac uniquement lorsqu'il est plein. (Gesterra, 2020, Ville de Beaconsfield, 2019, MRC Robert-Cliche, 2020, Ville de Drummondville, 2020). Ainsi, le camion de collecte effectue uniquement des arrêts/démarrages pour les bacs pleins ce qui optimise sa consommation. Les données récoltées lors du projet de collecte intelligente dans la ville de Drummondville n'ont pas permis de statuer sur les bénéfices de consommation. Cela pourrait s'expliquer notamment par la courte durée du projet : les citoyens ainsi que les chauffeurs n'ont peut-être pas eu le temps de s'adapter à la collecte. (C. Fullum, courriel, 19 novembre 2019).

Un camion de collecte effectue en moyenne plus de 200 km par jour. Pour un camion au diesel, les émissions varient entre 1 à 2 kgCO₂eq/km parcourue. Il émet aussi d'autres particules dans l'environnement comme des composés organiques volatiles (COV), des oxydes d'azote (NO_x), et des particules fines (PM). Ces émissions sont principalement dues à la combustion de l'hydrocarbure et à l'usure des pièces du camions (freins, pneus, moteur, etc.). (Al-Maalouf, 2012). Le tableau 4.1 résume les impacts d'un camion de collecte dans le secteur de l'île de Montréal. Ces données peuvent varier selon l'usage et le type de camion, mais elles donnent une idée de l'impact que provoque l'utilisation d'un camion diesel.

Tableau 4.1 Impact d'un camion de collecte au diesel de 9 tonnes sur son environnement (tiré de Al-Maalouf, 2012, p.17)

Indicateur d'impact	Donnée chiffrée	Source
CO ₂	1577,4 g/km	(Larsen et al., 2009a)
NO _x	4,38 g/km	(Pastorello, Dilara et Martini, 2011)
PM	0,01 g/km	(Pastorello, Dilara et Martini, 2011)
SO ₂	0,048 g/km	(Larsen et al., 2009a)
CO	1,32 g/km	(Larsen et al., 2009a)
HAP	0,72 g/km	(Larsen et al., 2009a)
COV	2,19 g/km	(Pastorello, Dilara et Martini, 2011)

Au niveau économique, un camion de collecte nécessite un investissement d'environ 250 000 \$. Le calcul d'immobilisation d'un camion de collecte s'effectue sur une durée de 10 ans, cela correspond à environ 2 000 h d'utilisation par an (8 h par jour sur 251 jours ouvrés). (Lagneau, 2018). En termes de distance, cela correspond à une durée de vie de plus de 500 000 km. L'entretien d'un camion de collecte au diésel est estimé à environ 6 500 \$/an en 2007, en tenant compte de l'inflation (2,7 % au Québec en décembre 2019), cela correspond à 6 700 \$/an. (Emery et al., 2007 et Statistique Canada, 2019). En tenant compte de l'investissement initial, des coûts de carburant et de l'entretien, un camion au diésel revient à 1,97 \$/km (0,50 \$/km pour l'immobilisation, 1,34 \$/km pour le diésel, 0,13 \$/km pour l'entretien). Il est à remarquer que plus de la moitié du coût total du camion revient à l'utilisation du diésel (70 %). Dans la littérature, le coût horaire de la collecte (en tenant compte du salaire du chauffeur, d'environ 20 \$/h) varie entre 70 et 137 \$/h. (Lagneau, 2018, Ville de Montréal, 2005, Nobert, Messier, et Leduc, 2005).

4.2. L'utilisation de biocarburant

L'utilisation du biodiésel pourrait être une solution pour limiter les impacts de la collecte sur l'environnement. Le biodiésel utilisé est principalement composé d'un pourcentage de biodiésel issu de graisse animale, d'huile de friture ou autres et de diésel pétrolier. Ce pourcentage varie entre 5 % (B5) et 20 % (B20). Son utilisation est possible dans les moteurs roulant au diésel sans contre-indication par le constructeur, ce qui fait de cette option-là plus simple à implanter sur le court terme. (MERN, 2019b).

Le biodiésel pur (B100) contient moins d'énergie que le diésel pétrolier par unité de masse (8 % moins d'énergie) et il est plus lourd que le diésel pétrolier (5 % plus lourd). Cependant, un mélange de types B20, c'est-à-dire, 20 % de biodiésel et 80 % de diésel pétrolier, ne représente qu'un faible impact sur la capacité énergétique et le poids de ce carburant par rapport au diésel pétrolier (0,5 % pour le B20 et négligeable pour le B5). (Société de transport de Montréal [STM], 2002 et STM, 2003).

Depuis 2017, la Ville de Pointe-Claire oblige à son collecteur l'utilisation de biodiésel B5 lors de la période estivale. Cette action s'inscrit dans leurs initiatives de développement durable. Elle devrait permettre de réduire les gaz à effet de serre. Le reste de l'année, les camions de collecte circulent au diésel. (Ville de Pointe-Claire, 2017). Dans son cahier des charges pour l'appel d'offres 2019, elle a mis en place un barème de notation des soumissionnaires prenant en compte des aspects environnementaux. De plus, l'utilisation de biodiésel B5 l'été est devenue une obligation et elle s'engage à faire une surveillance aléatoire afin d'assurer une concentration minimale de biodiésel. Tout camion ne respectant pas le type de carburant sera déclaré en infraction. (Ville de Pointe-Claire, 2019). La Ville

de Pointe-Claire est encore à ses débuts dans sa réduction des impacts de la collecte : l'utilisation de biodiésel sur une partie de l'année n'a pas un si grand impact en termes de réduction des GES. Le dernier appel d'offres a été concluant puisque c'est celui qui a mis de l'avant l'utilisation d'un carburant vert qui l'a remporté. (E. Jobidon, courriel, 21 février 2020).

Il existe au Québec d'autres initiatives visant l'utilisation du biodiésel. Par exemple, Ville-Marie, municipalité en Abitibi-Témiscamingue, alimente ses véhicules municipaux avec du biodiésel B5, dont 7 bennes à ordures dédiées à la collecte des encombrants. Il est en de même pour la ville de Victoriaville et la ville de Mont-Tremblant. (Équiterre, 2008). En 2012, Gaudreau Environnement est allé de l'avant en utilisant du biodiésel pour deux de ses camions de collecte. (Gagnon, 2012). Les camions utilisaient du biodiésel composé à 50 % d'huiles végétales usées. Pour deux camions, cela représentait 40 000 litres/an de biodiésel. Cette initiative a été appuyée par le gouvernement fédéral. (Phare Climat, 2008).

Comme le secteur de la collecte est très compétitif, notamment lors de l'utilisation de carburant plus vert, il est difficile de trouver des données justes et fiables de la réduction des impacts liée à l'utilisation du biodiésel. Cependant, une étude réalisée par la Société des Transports de Montréal (STM) sur les bus pourrait nous apporter des données. Comme les conditions d'utilisation des bus sont presque similaires à celle des camions de collecte (de nombreux arrêt/démarrage), il pourrait avoir de forte chance que les données liées à la réduction des impacts soient similaires.

Le projet Biobus a été réalisé sur une année entière de 2002 à 2003. L'étude a permis de faire le test de différent type de biodiésel (d'origine animale, végétale et à base huiles de friture) sur plus de 155 autobus de la STM dans le centre-ville de Montréal. Le principal frein de l'étude était lié au coût élevé du biodiésel : l'écart était de plus de 20 cents le litre comparativement au diesel pétrolier. Par ailleurs, le secteur de production de biodiésel au Québec n'était pas en mesure de fournir les quantités de biodiésel voulu, ce qui a mené à la non-application de la mesure à l'ensemble de la flotte. (Gagné, 2006).

Cette étude a permis de démontrer que l'utilisation de biodiésel B20 permet de diminuer les émissions de tous les polluants associés à la combustion du diesel, à savoir, les oxydes d'azote (NOx), particules fines, hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les sulfates (SO₂) et le monoxyde de carbone (CO). Pour les camions, les réductions varient entre 5 et 30 % selon le polluant (5 % pour les NOx et 30 % pour le CO). De plus, il améliore la lubrification du moteur. (Gagné, 2006, STM, 2002 et STM, 2003). L'étude a évalué que le potentiel de réduction des émissions de GES est de l'ordre de 17 % pour le B20 et de 4,5 % pour le B5. Cependant, les émissions directes de CO₂ mesurées en sortie du pot

d'échappement montrent que l'impact du biodiésel est négligeable et que seul le B20 d'origine animale permet d'atteindre une réduction de l'ordre de 2 %. (STM, 2003).

L'étude montre aussi que l'origine du biodiésel peut avoir une influence sur les émissions de polluants atmosphériques. Le projet Biobus a fait le test de trois types de biodiésel. Un tableau détaillé qui synthétise les données de l'étude est présenté en annexe 3. La réduction des émissions est variable selon l'origine du biodiésel : la réduction des particules varie entre 18 % et 30 %, du CO entre 17 % et 25 % et les hydrocarbures entre 7 % et 13 %. L'étude démontre par ailleurs que l'utilisation de biodiésel n'a aucun impact significatif sur les émissions de NOx. (STM, 2002 et STM, 2003).

L'utilisation du biodiésel B20 à la place de diesel pétrolier n'a pas vraiment de désavantage par rapport à la maintenance des véhicules. Les principaux coûts supplémentaires engendrés résident dans la première année de transition où il faut prévoir un changement des filtres (environ 100\$ par véhicule). (STM, 2003).

4.3. L'utilisation du gaz naturel

L'utilisation de gaz naturel dans le secteur du transport est en forte évolution au Québec. En 2018, il existe au Québec 27 stations de ravitaillements publiques ou privées, dont 23 qui proposent du gaz naturel comprimé (GNC) et 4 du gaz naturel liquéfié (GNL). Ces stations permettent d'alimenter près de 780 véhicules dont 80 % sont des véhicules lourds. (Whitmore et Pineau, 2018). L'utilisation du GNC s'est intensifiée au Québec ce qui a permis de rendre la technologie viable et accessible. (Gaz Métro, 2016).

Au niveau du secteur de la collecte des matières résiduelles, plusieurs entrepreneurs ont pris le virage du gaz naturel, à savoir, Sani-Estrie, EBI, BFI, TTI Environnement, ABC Environnement et Gaudreau Environnement. (Énergir, 2016). L'un des premiers est TTI Environnement Inc. qui fait l'achat d'un camion de collecte au gaz naturel comprimé en 2015. Le camion était auparavant alimenté aux stations publiques de ravitaillement au gaz naturel d'EBI Énergie, situé à Montréal-Est. (TTI Environnement, 2015). En 2014, Gaudreau Environnement a fait le test de deux camions au GNC sur les circuits de collecte de Drummondville. La compagnie avait installé une station de ravitaillement privé sur son terrain à Québec. Ce projet pilote a permis de démontrer que l'utilisation du GNC permettait de faire des économies de l'ordre de 40 % sur les coûts de carburant en comparaison avec le diesel. La réduction des émissions de GES avait été estimée à plus de 25 %. (La Nouvelle union, 2014 et Énergir, 2014).

Au niveau économique, les camions au gaz naturel demandent environ 50 000 \$ de plus par véhicule, soit un coût supplémentaire de 20 % par rapport au diesel. En tenant compte de la différence de prix entre le gaz naturel et le diesel, le retour sur investissement est d'environ deux ans. (La Presse, 2017, 19 juin). Le programme d'Écocamionnage du gouvernement du Québec permet d'obtenir une subvention représentant 30 % des dépenses admissibles avec un montant maximal de 30 000 \$ pour l'achat d'un véhicule au gaz naturel. (Ministère des Transports, 2019). L'autonomie des véhicules GNC est similaire à celle des véhicules diesel, un plein est l'équivalent de 280 à 370 litres de diesel et permet de faire 200 à 300 km par jour. (S. Théolis, courriel, 4 février 2020, et Waste Management, 2014). L'utilisation du carburant GNC permet de faire des économies de 40 cents par rapport au litre diesel équivalent. (Waste Management, 2014). L'entretien d'un camion de collecte au GNC est réduit d'environ 10 % par rapport à un camion diesel, cela représente environ 6 000 \$/an. (Emery et al., 2007 et S. Théolis, courriel, 4 février 2020). En tenant compte de l'investissement initial, des coûts de carburant et de l'entretien, un camion au GNC revient à 1,66 \$/km (0,60 \$/km pour l'immobilisation, 0,94 \$/km pour le GNC, 0,12 \$/km pour l'entretien). Il est à remarquer que plus de la moitié du coût total du camion revient à l'utilisation du GNC (56 %). Cette analyse ne prend pas en compte l'investissement réalisé pour la station de ravitaillement. En considérant que le collecteur ait accès à une station publique, le coût total d'utilisation d'un camion au GNC est environ 15 % moins élevé que son homologue diesel.

La plus grande problématique liée à l'utilisation du GNC ou du GNL est le ravitaillement. Même si les coûts de carburant diminuent, il faut avoir accès à une station de ravitaillement. Avoir sa propre station coûte cher et se rentabilise uniquement lorsque la flotte de véhicule est conséquente. Une station de ravitaillement nécessite un investissement de l'ordre de 1,5 million de dollars. (La Presse, 2017, 19 juin). Pour pallier ce problème, les compagnies privées peuvent collaborer et multiplier les usages d'une station de ravitaillement. Par exemple, Sani-Estrie propose au camion roulant au GNC de s'approvisionner à sa station pour un coût de 1,018 \$ du kilogramme de gaz naturel comprimé (GNC) (tarif en vigueur en septembre 2019). (Sani-Estrie, 2019).

Les stations de ravitaillement peuvent être équipées de compresseurs rapides permettant de faire une recharge en quelques minutes. (La Presse, 2017). Ce type de station est utilisé par les entreprises qui ont besoin d'une recharge rapide pour effectuer leurs circuits. Cependant, lorsque l'entreprise n'a pas besoin de revenir à la station avant de repartir exécuter un circuit, il peut faire l'usage d'un ravitaillement lent durant toute la nuit. La recharge dure une douzaine d'heures. (La Presse, 2017, 19 juin). Ce type de station est à privilégier lorsque la flotte effectue des courtes distances et revient à leur

point de départ, mais il est difficile de multiplier les usages d'une station à recharge lente. L'investissement sera entièrement soutenu par la compagnie, ce qui demande d'avoir une flotte de véhicule GNC conséquente pour être économiquement viable.

Les bénéfices de l'utilisation du GNC sont liés aux économies de carburant (30 à 40 % par km), à ses émissions de GES (25 % de moins que le diesel) et le silence associé à la technologie (voir tableau 4.2).

Tableau 4.2 Impact associé à l'utilisation d'un camion de collecte au GNC (compilation d'après : Gaz Métro, 2016, Sani-Estrie, 2018, Énergir, 2016, EBI, 2019b, Théolis, 2020)

Indicateur d'impact	Réduction associée	Émissions associées
CO ₂	Jusqu'à 25 %	1183 g/km
NO _x	Jusqu'à 70 %	1,31 g/km
PM	Jusqu'à 97 %	0,3 mg/km
SO ₂	Jusqu'à 99 %	0,48 mg/km
CO	Non renseigné	Non renseigné
HAP	Non renseigné	Non renseigné
COV	Non renseigné	Non renseigné
Bruit	Jusqu'à -10 dB	90 dB

En effet, dans le cas de Sani-Estrie, les gains sont notables : réduction jusqu'à 18 % des GES, une réduction du bruit des moteurs jusqu'à -10 dB et moins de fumée noire lors des arrêts/démarrages. (Gaz Métro, 2016, Sani-Estrie, 2018 et Énergir, 2016). Le GNC est un carburant d'avenir puisque selon Énergir le prix devrait rester stable et bas encore pour une dizaine d'années. (Gaz Métro, 2016). De plus, il n'y a pas de problématique de contamination des milieux naturels lors d'un déversement puisque le gaz naturel est plus léger que l'air, lors d'une fuite il se dissipe naturellement. Finalement, c'est un gaz non toxique pour les chauffeurs. (Sani-Estrie, 2019).

Les camions n'ont pas besoin de filtres à particules ni de système de réduction catalytique sélective pour respecter les normes d'émissions des polluants atmosphériques. Ils n'émettent pas de particules fines (97 % moins que le diesel), et rejettent que très peu d'oxydes d'azote (70 %) et encore moins de dioxyde de soufre (99 %). La combustion du gaz naturel n'émet ni métaux lourds ni particules de suie. (EBI, 2019b). Comparativement au diesel, le gaz naturel permet de réduire la pollution sur l'ensemble du cycle de vie de 34 %. (EBI, 2019a).

Au niveau de la maintenance, la fréquence des actions de maintenance du moteur est réduite. En effet, la contamination de l'huile par la suie est pratiquement inexistante. Ce qui permet d'allonger les intervalles de changement d'huile et d'effectuer des économies. D'après l'expérience de la société TTI Environnement, la réduction des coûts de maintenance peut être estimée à environ 10 %. (Théolis, 2020). Le temps de ravitaillement est le même que celui de son homologue diesel avec une station rapide, et le ravitaillement ne comporte pas plus de danger que le diesel. Le principal défi est le manque de station publique. Il serait avantageux pour le développement de la technologie qu'Énergir mette en place des actions afin d'augmenter et de promouvoir l'implantation de station publique. (S. Théolis, courriel, 4 février 2020).

L'image développée par l'utilisation du GNC est positive auprès de la clientèle. La principale raison est la réduction des émissions de GES (jusqu'à 25 %). (S. Théolis, courriel, 4 février 2020). En effet, pour réduire les impacts de la collecte au niveau des émissions GES, certaines municipalités québécoises mettent en place un système d'évaluation des soumissionnaires pondérés avec des critères environnementaux dans leur appel d'offres. C'est le cas de la Ville de Pointe Claire qui dans son appel d'offres 2020-2023 a mis en place une pondération afin de diminuer le bruit et les émissions de GES liés à la collecte. Elle attribuait des points supplémentaires pour des initiatives plus responsables par exemple l'utilisation de camions hybrides, électrique, au gaz naturel renouvelable ou d'autres technologies vertes. (Ville de Pointe-Claire, 2019).

4.4. L'amélioration de l'efficacité des camions de collecte

Les camions de collecte présents sur le marché sont souvent très lourds ce qui demande beaucoup d'énergie pour les mettre en mouvement à chaque arrêt/démarrage. Dans la section 4.1, il est mentionné que la consommation varie entre 50 l/100km à 140 l/100km. Une façon de réduire cette consommation est de miser sur l'efficacité énergétique du véhicule.

Généralement, les camions de collecte sont en acier ce qui augmente inutilement le poids du véhicule. Afin d'améliorer l'efficacité énergétique des camions, Durabac a mis en place une benne cylindrique et un bras automatisé entièrement en aluminium. Cela permet de réduire le poids du véhicule jusqu'à 30 % par rapport à une benne classique. De plus, sa forme cylindrique permet d'augmenter son volume de collecte jusqu'à 30 %. La benne intègre un système de compaction à deux niveaux (tassage et compaction) qui permet de réduire la demande énergétique liée à l'utilisation de la benne. Cette innovation devrait permettre de réduire les frais d'exploitations de 20 % : moins d'aller-retour, comme la benne est plus légère la consommation devrait diminuer (jusqu'à 15 %), le système à deux niveaux de

compaction permet de réduire l'usure des pièces et ainsi les besoins de maintenance. (Théroux, 2016, 12 octobre et Durabac, 2020).

Pour améliorer l'efficacité énergétique des camions de collecte, il est possible de revoir comment l'énergie est utilisée au sein des circuits de collecte et du véhicule. En tenant en compte des spécifications techniques des constructeurs de benne à compaction hydraulique et les données liées à une collecte, il est possible d'estimer la consommation liée à la compaction hydraulique et à l'utilisation du bras. Le calcul détaillé est présent en annexe 4. La consommation d'une benne à compaction tout hydraulique demande environ 154 kWh pour une collecte de 1 000 portes. Sur une consommation de 126 l/100km pour effectuer le circuit, plus de 40 l/100km sont destinés à l'alimentation de la benne et du bras. (Voir annexe 4 pour le détail du calcul). La solution serait d'utiliser une benne entièrement électrique. En se basant sur le modèle développé par la compagnie Boivin Évolution, l'utilisation d'une benne tout électrique qui consommerait 46 kWh pour environ 1 000 bacs permettrait de réduire la consommation en énergie de 30 %. (Boivin Évolution, 2020).

Comme un camion de collecte effectue de nombreux arrêts/démarrages tout au long de son circuit de collecte, il serait avantageux de pouvoir utiliser l'énergie cinétique perdue à chaque arrêt pour permettre de faire fonctionner les équipements (compaction et bras) ou même faciliter le redémarrage. C'est à partir de cette idée qu'est née Effenco. Premièrement imaginée par M. Arsenault comme un système hybride hydraulique, la compagnie a développé sa technologie hybride électrique Start-Stop en 2012. (Arsenault, 2008 et Derichebourg Environnement, 2018).

Le système hybride hydraulique à pression assistée, premièrement étudié par M. Arsenault, permettait de récupérer l'énergie de freinage pour alimenter le bras télescopique et le vérin hydraulique. Ces équipements sont toujours utilisés à l'arrêt après un freinage du camion. Il avait évalué que le système permettrait d'atteindre une réduction de la consommation jusqu'à 15 %. (Arsenault, 2008).

Aujourd'hui, la technologie existe et est éprouvée par la compagnie de collecte Derichebourg Environnement. Au Québec, 100 camions sont équipés de cette technologie, et la compagnie Derichebourg souhaite l'exporter en France. (Derichebourg Environnement, 2018). La technologie d'Effenco hybride électrique Start-Stop permet d'arrêter le moteur du camion dès que celui-ci est à l'arrêt tout en maintenant en opération les équipements du camion (bras, compaction, climatisation/chauffage). Comme un camion de collecte passe plus de 50 % de son temps à l'arrêt, le moteur éteint permet de réduire les émissions de GES de 30 %, de réduire la consommation de 25 %, de réduire les impacts sonores (ce qui améliore la sécurité autour du camion et les conditions de travail des

chauffeurs), et finalement permet de prolonger la vie des moteurs (50 % moins d'heures d'utilisation). (Derichebourg Environnement, 2018).

La technologie d'Effenco est simple d'installation : elle ne nécessite pas de modifications structurales du véhicule, n'a pas d'impact sur la capacité de chargement, et immobilise le camion seulement une semaine pour l'installation. (Derichebourg Environnement, 2018). Le programme Écocamionnage du Ministère des Transports du Québec permet d'aider financièrement les compagnies privées à s'en équiper. (Fonds Écoleader, 2020).

4.5. L'utilisation de l'électricité

Au Québec, il existe une seule compagnie qui propose des camions de collecte tout électrique. La compagnie Lion électrique conçoit, fabrique et assemble tous les composants de ses véhicules (châssis, batterie, cabine et groupe moteur) au Québec. Sur la fiche technique du camion LION, il est indiqué que le véhicule possède une autonomie jusqu'à 400 km, qu'il consomme en moyenne 120 kWh/100km, et que sa recharge peut se faire en 2,5 heures ou en 16 heures dépendamment du type de recharge. (La compagnie Lion électrique, 2020). Comme l'ensemble du camion est électrique, cela permet de profiter d'une expérience de travail sans nuisance sonore favorisant la sécurité et le bien-être des citoyens. Le camion ne possède ni huile, ni pompe, ni tuyau ou boyau ce qui permet de réduire les coûts d'entretien et limite les fuites et déversements d'huile dans les milieux naturels. Lors des freinages, l'énergie cinétique du véhicule est convertie en électricité stockée dans les batteries. Les freins sont alors épargnés ce qui les permettent de durer jusqu'à 3 fois plus longtemps. (P. Laurin, courriel, 25 février 2020). Ainsi, les émissions associées (en majorité les particules fines) devraient être évitées également.

La compagnie estime que les coûts d'entretien seraient réduits de 60 % et les coûts d'énergie de 80 %. Ces pourcentages de réduction proviennent des cinq années d'expériences de l'entreprise avec les autobus scolaires, avec plus de 6 millions de kilomètres parcourus. (P. Laurin, courriel, 25 février 2020). La benne de collecte tout électrique a une autonomie de 1 000 bacs/jour, et est équipée d'une plaque chauffante pour limiter la baisse d'autonomie liée aux températures hivernales. (La compagnie Lion électrique, 2020). Depuis peu, la compagnie propose d'intégrer la batterie de la benne à celui du camion, cela permettrait de réaliser plus de bac lorsque le circuit est plus dense. (P. Laurin, courriel, 25 février 2020).

D'après une discussion réalisée auprès d'un membre de la compagnie, la principale difficulté rencontrée chez les clients est la gestion de la recharge pour les flottes importantes. En effet, comme la recharge

demande une puissance de 20 à 100 kW par camion, il faut que le site de dépôt possède le contrat associé et un transformateur adéquat permettant d'assurer la prise de puissance. La compagnie possède une équipe terrain spécialisée qui se déplace directement chez le client pour lui faire des suggestions et des recommandations afin de planifier l'infrastructure de recharge. (P. Laurin, courriel, 25 février 2020).

Les batteries sont protégées par une garantie de durée de vie de 4 000 cycles/12 ans, ce qui correspond à 1 600 000 km. Le début des collectes au Québec est prévu en mars 2020. L'investissement nécessaire pour un camion électrique est d'environ 2,5 fois celui d'un camion diesel, à savoir 700 000 \$. (P. Laurin, courriel, 25 février 2020 et F. Gauthier, conversation téléphonique, 18 février 2020). Le programme d'Écocardionnage du gouvernement du Québec permet d'obtenir une subvention représentant 50 % des dépenses admissibles avec un montant maximal de 75 000 \$ pour l'achat d'un véhicule électrique. (Ministère des Transports, 2019)

Afin d'éprouver la technologie, la MRC d'Arthabaska a fait le test en automne 2019 d'un camion LION. Les tests ont duré 8 jours : 5 jours sur des circuits de collecte de déchets et 3 jours sur des circuits de collecte du recyclage. L'autonomie de la benne et du châssis est suffisante pour réaliser les circuits (en moyenne de 180 km, avec jusqu'à 1200 portes). Les problèmes relevés lors des tests se situent au niveau de la benne électrique. Sur les 8 jours de test, la benne a subi beaucoup de bris mécaniques. La vis sans fin qui sert à vider la benne est entraînée par une chaîne qui n'est pas protégée ce qui la rend vulnérable et augmente les risques de bris (surtout lors d'une collecte de recyclage où il peut y avoir des fragments en verre). La benne ne se déverse pas comme les bennes habituelles du collecteur. La vis sans fin n'éjecte pas totalement la matière, il faut aller la chercher à la main, ce qui n'est pas optimal lorsqu'il faut effectuer plusieurs types de collecte avec le même camion. Le bras mécanique ne fonctionne pas comme les bennes actuelles : le chauffeur ne peut pas faire des allers/retour avec le bras pour expulser la matière collée au fond du bac. Cela est problématique en hiver lorsque la matière organique se colle au fond du bac, le chauffeur n'a pas la possibilité de brasser l'intérieur du bac. Une formation pour les chauffeurs pour qu'ils changent leur habitude, n'aurait là pas d'impact. Selon la MRC d'Arthabaska, le camion LION est prêt à circuler sur les routes québécoises cependant il reste encore des améliorations à apporter au niveau de la benne pour la rendre plus fonctionnelle. Remplacer la benne électrique par une benne de collecte classique pourrait être une solution sur le court terme afin de rendre viable la technologie. (F. Gauthier, conversation téléphonique, 18 février 2020).

Le camion développé par LION se recharge sur des bornes de niveau 2 et 3. Une borne de niveau 2 est une borne de recharge de 240 V raccordés au réseau par un électricien qualifié. Une borne de recharge

de niveau 3 doit être branchée sur un réseau de 400 V. (Association canadienne des automobilistes du Québec [CAA Québec], 2020a). Le gouvernement du Québec rembourse en partie les coûts d'achat et d'installation d'une borne (le programme Branché au Travail rembourse jusqu'à 50 % des frais jusqu'à un maximum de 5 000 \$). (Transition énergétique Québec, 2020). Une borne de recharge de niveau 2 résidentielle coûte en moyenne 1 000 \$ et l'installation coûte en moyenne 700 \$ (tout dépendamment du type de travaux à effectuer). (Bornes électriques Québec, 2019). En considérant que l'installation de la borne ne nécessite pas de travaux supplémentaires auprès d'Hydro-Québec, le coût total d'une station de recharge pour le camion LION devrait avoisiner 1 700 \$ sans déduction de la subvention possible.

Il existe d'autres compagnies au Québec qui proposent une motorisation électrique pour des camions légers à lourds. Pour les véhicules de classes 2 à 4, Ecotuned propose une conversion des camions de modèle Ford, GM et Dodge en électrique. Le système de conversion est admissible à des subventions gouvernementales. (P. Gladu, conversation présentielle, 19 novembre 2019). Pour les camions de classe supérieure, NordResa propose des châssis entièrement électriques sélectionnés sur la base du châssis Isuzu Série N. La compagnie offre une garantie de 5 ans sur la motorisation des véhicules. La consommation moyenne du modèle de classe 6 est d'environ 128 kWh/100km. (P. Desrochers, conversation présentielle, 19 novembre 2019).

Au niveau économique, les camions de collecte électriques demandent un investissement supplémentaire de 280 % par rapport au diesel. De plus, il faut prendre en compte l'achat et la maintenance de la borne de recharge électrique. Pour l'analyse des coûts totaux, il sera plus simple de considérer uniquement le coût de la borne de niveau 2, à savoir 1 700 \$. (Bornes électriques Québec, 2019). La consommation du véhicule avec sa benne pour une collecte de 1 000 bacs sur un circuit d'environ 100 km est estimée à 166 kWh, soit 18 \$ en se basant sur un coût de 0,1079 \$/kWh (taxes incluses, au tarif en vigueur le 1er avril 2019). (Hydro-Québec, 2019a). Le tarif résidentiel a été choisi puisqu'il est moins avantageux que le tarif commercial. Cela permet de se placer dans le pire des cas. En supposant que les données de réduction de la maintenance du constructeur soient véridiques (60 % de réduction par rapport au diesel), le coût de maintenance d'un camion électrique à l'année serait d'environ 2 700 \$ par année ou par 50 000 km. (Emery et al., 2007 et La compagnie Lion électrique, 2020). En tenant compte de l'investissement initial, des coûts de carburant et de l'entretien, un camion électrique revient à 1,63 \$/km (1,40 \$/km pour l'immobilisation (500 000 km - 10 ans), 0,18 \$/km pour l'hydroélectricité, 0,05 \$/km pour l'entretien). Il est à remarquer que l'immobilisation est calculée sur la base d'une durée de vie de l'équipement de 500 000 km (durée de vie moyenne des camions diesel), mais

en prenant la donnée du constructeur à savoir 1 600 000 km, le coût total de revient descend à 0,67 \$/km. Cette analyse ne prend pas en compte les modifications potentielles du réseau électrique d'Hydro-Québec. Le coût total d'utilisation d'un camion électrique est 17 % à 66 % moins élevé que son homologue diesel.

Le recyclage des batteries au lithium-ion est complexe en raison des différents produits chimiques qu'elles contiennent et des risques associés à leur démontage. La technologie de recyclage la plus utilisée est la pyrolyse, cependant elle ne récupère que 50 % des différentes matières premières contenues dans les batteries. Il existe seulement deux usines de recyclage de batteries au Canada dont une spécialisée dans les batteries, la plus active est Retrie, une compagnie en Colombie-Britannique, qui récupère jusqu'à 4 500 tonnes par an. (Propulsion Québec, 2019a). Les batteries recyclées par Retrie demandent des coûts de transport élevés en raison de la réglementation en vigueur (les batteries sont considérées comme des produits dangereux) et de leur taille. Au Québec, la responsabilité élargie des producteurs (REP) ne s'applique pas aux batteries des véhicules hybrides ou électriques. Elles sont souvent disposées en attente chez les constructeurs et concessionnaires automobiles afin de trouver des solutions efficaces de récupération et de recyclage. (CIRAIG, 2017). Pour recycler toutes ces batteries en fin de vie localement, le Québec aurait besoin d'installations de recyclage d'une capacité comprise entre 17 500 et 26 400 tonnes métriques en 2030. Cependant, le secteur du recyclage des batteries est encore sous-développé au Québec. (Propulsion Québec, 2019a). Le Québec prévoit un budget de 18 millions de dollars sur cinq ans pour le développement de la filière de recyclage des batteries des véhicules électriques. (Gouvernement du Québec, 2020).

Dans l'atteinte de son objectif d'électrification des transports, le gouvernement du Québec souhaite favoriser les innovations de recyclage de batterie local. Le projet de recyclage de batterie de l'Université de Montréal en partenariat avec le Collège Shawinigan et le Centre national en électrochimie et en technologies environnementales (CNETE) a reçu une subvention de 3,9 M\$ du gouvernement du Canada et du Québec. Le projet s'étale sur une durée de cinq ans et devrait permettre d'implanter une usine de recyclage de batteries à Shawinigan. (Université de Montréal, 2019). Dans la continuité, le projet d'usine pilote de recyclage de batteries lithium-ion de Recyclage Lithion a reçu une subvention de 4,8 M\$. Contrairement au procédé habituel de pyrolyse, la technologie développée permettra d'extraire 95 % des matériaux des batteries. Le procédé utilise en boucle fermée des solvants pour extraire les métaux. Son démarrage est prévu en 2020 et permettrait de recycler 200 tonnes par an. (Léveillé, 2019, 10 décembre).

5. PORTRAIT DES TECHNOLOGIES ALTERNATIVES POUR LA COLLECTE DANS LE MONDE

À travers le monde, l'utilisation des carburants verts s'est fortement développée dans les années 2010, principalement pour des raisons économiques. En Europe, les collecteurs se sont d'abord tournés vers le gaz naturel pour son faible coût par rapport au diesel. Puis, la technologie hybride a fait son apparition à la même période, permettant d'offrir une solution efficace pour limiter les nuisances au sein des grandes métropoles (émissions de polluant et de bruit). Finalement, depuis quelques années, la technologie électrique commence à être une solution envisagée. La technologie semble être prête et les collecteurs sont prêts à faire le pas pour des raisons économiques et environnementales.

5.1. Des camions de collecte au gaz naturel

En Amérique du Nord, Waste Management fut l'un des premiers collecteurs privés à prendre le virage du gaz naturel. En 2014, la compagnie opérait une flotte de 41 camions au GNC dans la région d'Ottawa. Chaque année, sa flotte consommait jusqu'à 40 000 litres par camion pour une consommation moyenne de 80 l/100km. Le passage au GNC a permis de réaliser de forte économie : jusqu'à 0,40 \$ par litre de diesel équivalent, soit environ 640 000 \$ par an pour l'ensemble de la flotte. (Waste Management, 2014).

En Europe, l'utilisation du gaz naturel pour les véhicules lourds a commencé beaucoup plus tôt. En Suède, l'utilisation du gaz naturel débute dès 1994, lorsque Renova la société de collecte à Göteborg fait l'achat d'une flotte de 50 camions Volvo CNG. (C40 Cities, 2011). En France, la société Suez collectait déjà avec des camions au GNC depuis les années 2000. Aujourd'hui, elle possède environ 90 stations publiques de ravitaillement et un parc de 110 véhicules. En moyenne, le coût d'un véhicule de collecte roulant au GNC est 40 000 euros plus chers. La consommation varie entre 70 kg/100km (en milieu rural) à 100 kg/100km (en milieu urbain). L'utilisation du GNC devient économiquement avantageux en France, puisque l'État subventionne jusqu'à 40 % du coût du véhicule et que le gaz naturel coûte moins cher que le diesel conventionnel (entre 0,80 et 1,10 euro/kg). De plus, les entreprises peuvent faire l'achat de certificats de biogaz permettant de réduire les GES de sa flotte jusqu'à 80 % pour un coût supplémentaire de 15 %. (Fondation Tuck, 2019). La motorisation au gaz naturel a l'avantage de réduire jusqu'à 4 dB le niveau de bruit. (Bio Intelligence Service, 2012).

Contrairement au contexte nord-américain, la société Suez a pu noter que la maintenance était 30 % plus coûteuse. Le passage au GNC apporte son lot de complexité technique : stockage à bord sous pression, procédures spécifiques à observer lors des ravitaillements, de la maintenance et des

dépannages. L'entretien courant est proche du diesel conventionnel, il se réalise au niveau du système d'allumage du moteur, du calculateur de contrôle de débit gaz, de la sonde lambda et du pot catalytique. Il faut aussi purger régulièrement le circuit haute pression de gaz. (Fondation Tuck, 2019)

Des études terrain ont été réalisées dans la ville de Milan afin de comparer l'impact d'un camion GNC par rapport au diesel conventionnel. Les carburants utilisés pour les tests étaient un mélange diesel avec du biodiesel à 25 % (B25) et du gaz naturel comprimé (GNC). La vitesse moyenne collectée était de 8 km/h. (Fontaras et al., 2012). Pour les conditions de l'étude et le contexte des circuits, les capteurs ont enregistré les émissions moyennes présentées dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1 Impact d'un camion de collecte au diesel de 26 tonnes à Milan (tiré de Fontaras et al., 2012)

Indicateur d'impact	Donnée chiffrée (Diesel B25)	Donnée chiffrée (GNC)
CO ₂	2 400 g/km	3 600 g/km
NO _x	32,3 g/km	4,38 g/km
PM	46,4 mg/km	11,4 mg/km
CO	7,4 g/km	15,8 g/km
HAP	0,21 g/km	2,19 g/km

L'étude démontre que les véhicules au GNC présentent un avantage pour la réduction des émissions de NO_x et des particules, mais manquent d'efficacité pour les autres émissions en particulier pour les gaz à effet de serre. (Fontaras et al., 2012).

Aux États-Unis, même si le prix des hydrocarbures est relativement plus bas qu'au Canada, l'utilisation du GNC est économiquement rentable. D'après une étude américaine réalisée en 2017, un camion au GNC de la marque Mack consomme en moyenne 115 l/100km (équivalent diesel). Il coûte en moyenne 50 à 80 000 \$ US de plus que le diesel. Les coûts de maintenance avoisinent les 0,5 \$ US/km. Cependant, l'investissement nécessaire pour une station de ravitaillement, de l'ordre de 850 000 à 1 100 000 \$ US, freine les compagnies. (Zhao et Tatari, 2017). Les collecteurs privés peuvent espérer réaliser une économie de 0,56 \$ US par km parcouru en utilisant du GNC. Le retour d'investissement pour la flotte et les infrastructures varie entre 3 et 8 ans tout dépendamment du nombre de camions et de la station. L'achat d'une station double en moyenne le retour d'investissement. (U.S Department of Energy, 2014).

Pour faire un virage vers le gaz naturel efficace, les compagnies privilégient de mettre en place une formation pour les chauffeurs et les techniciens en amont du projet. Une formation d'un mois en avance permet d'obtenir les certifications nécessaires et permet de lutter contre la résistance face au changement. Il est possible de profiter de cette étape pour proposer au chauffeur une formation à l'écoconduite. (U.S Department of Energy, 2014). De plus, proposer une formation pour l'ensemble des salariés permet de favoriser l'implantation du projet par l'implication des opérateurs de la collecte et permet de démystifier certains tabous qui entourent la technologie. (Kostenko, et Dos Santos, 2014).

Une étude réalisée dans l'Ouest canadien démontre que les émissions totales de GES prises sur l'ensemble du cycle de vie d'un camion de collecte au GNV sont environ 24 % inférieures à celles du diesel conventionnel. (Rose et al., 2013). L'étude a été réalisée avec l'outil de calcul GHGenius. Les paramètres de l'étude se basent sur une consommation moyenne de 120 l/100km (12 l/h avec une vitesse moyenne de collecte de 10 km/h, collecte urbaine de 1 400 portes pour une distance de 54 km). L'étude démontre que la consommation de carburant est le plus grand contributeur des émissions GES des deux cas, représentant 70 à 75 % des émissions totales de GES. L'utilisation du GNC permet de réduire de 21 % les émissions de COV et de 44 % les Nox et les oxydes de soufre (SOx). (Rose et al., 2013).

5.2. Des camions de collecte hybrides

En Amérique du Nord, l'un des premiers systèmes d'hybridations des camions de collecte est RunWise. C'est un système hydraulique qui permet de récupérer l'énergie cinétique du véhicule lors de son freinage. Il utilise trois pompes, dont deux sont connectées au système de traction du véhicule. Dans la phase d'arrêt, l'énergie de freinage est captée et stockée et permet d'alimenter les autres composants du véhicule. L'énergie cinétique du camion en mouvement est convertie en énergie hydraulique. Lorsque le conducteur démarre, il bénéficie de l'énergie hydraulique stockée ce qui permet d'accélérer le camion. Le système a fait ses preuves aux États-Unis et permet de réaliser une économie de 50 % sur la consommation en carburant. (Hydraulics & Pneumatics, 2015). Un système comme celui de RunWise nécessite un investissement supplémentaire de l'ordre de 100 000 \$ US. (Danna, 2011). La consommation d'un camion diesel équipé du système RunWise est d'environ 58 l/100km. (Zhao et Tatari, 2017).

L'utilisation d'un système de régénération d'énergie lors du freinage permettrait de réduire la consommation du véhicule jusqu'à 40 % en passant par un modèle électrique. (Volvo Group Trucks Technology, 2013). Depuis 2008, la ville de Göteborg en collaboration avec les constructeurs

automobiles a lancé le tout premier camion de collecte hybride. Cela a abouti à la circulation de 15 véhicules hybrides électriques en 2011. Les camions sont équipés d'une propulsion électrique et diesel, et leur système de compactage est entièrement électrique. Son utilisation permet de faire des gains en carburant d'au moins 30 % par rapport à un camion classique. Comme la consommation est réduite, les émissions polluantes sont également réduites en conséquence. (Eltis, 2014).

En France, la technologie a été éprouvée et documentée. Le premier cas est celui de l'agglomération de Mulhouse Alsace. Elle a fait le test d'un camion de collecte hybride électrique de 26 tonnes sur une durée de 5 ans. Le constructeur a affiché un gain de consommation jusqu'à 25 %. Sur une mesure d'un an, les gains en carburant ont été de 23 %. Le camion avait une consommation moyenne de 52 l/100km, environ 16 litres de moins qu'un véhicule conventionnel. L'utilisation du mode électrique permettait de réduire les nuisances pour les riverains : le lève-conteneur électrique permettait la vidange des bacs sans avoir à redémarrer le moteur. (ADEME, 2019).

La seconde étude, est celui d'un camion de collecte hybride GNC/électrique. Le camion de 26 tonnes était équipé d'une benne de compaction électrique et d'un moteur GNC Euro 5. Tout d'abord, l'utilisation du gaz naturel permet de réduire les émissions de NOx de 2 à 5 fois, et le système électrique permet de réduire de 20 % la consommation de GNC. L'étude démontre une diminution de la pollution sonore de 40 %, soit de 107 dB à 72 dB. (ADEME, 2012). La combinaison de ces deux technologies vertes a permis de réaliser des économies de carburant et parallèlement de diminuer les frais d'exploitations. La compagnie est passée d'une consommation moyenne de 68 l/100km et des frais d'exploitation de 0,95 euro/km à un coût de 0,43 euro/km. (ADEME, 2012). Le véhicule était rechargé à la station du dépôt avec un temps de charge moyen de 15 minutes pour le gaz naturel et 8 heures pour l'électricité (borne de 380V). (ADEME, 2012).

Pour que la transition vers les technologies vertes soit efficace, les deux porteurs de projet ont identifié des facteurs clés. Il est tout d'abord nécessaire que tout le personnel s'implique. Pour cela, il est préférable de préparer en amont la transition : faire une visite d'exploitation, associer et former les mécaniciens avec le prestataire, impliquer le chauffeur avec un essai routier et une formation. La transition doit venir d'une volonté politique. Dans le cas du véhicule GNC/électrique, la compagnie s'appuyait sur une forte conscience environnementale : la certification ISO 14001. (ADEME, 2012 et ADEME, 2019).

5.3. Des camions de collecte tout électriques

La circulation du tout premier camion de collecte électrique a eu lieu en 1928 à Paris. À l'époque, les camions étaient dotés d'un moteur à courant continu et de grosse batterie en plomb. (Fondation Tuck, 2019). La collecte avec un camion tout électrique était autrefois destinée uniquement aux grandes villes où la pollution de l'air est un enjeu très important. Le camion électrique fait des apparitions timides en France dans des métropoles moins grandes dans les années 2010, sous la forme d'une mini-benne à ordures. C'est le cas de Maxity à Lyon, un véhicule de 4,5 tonnes destinées à la collecte dans les rues étroites de la métropole. (Industrie & Technologies, 2014).

Depuis 2019, la métropole de Lyon s'est dotée d'un véritable camion de collecte électrique de 26 tonnes. Le véhicule est conçu et fabriqué en France par Renault. Il possède une batterie de 200kW permettant d'assurer une collecte urbaine. Le moteur est sollicité lors des périodes de freinage ce qui permet de limiter l'usure des freins et les émissions associées. Il faut savoir que pour les camions diesel de norme EURO 6, les émissions de particules sont principalement dues à l'usure des pneus et des freins. (Grumel, 2018, 27 novembre et De Sousa, 2019, 21 juin).

Plusieurs villes européennes ont pu tester l'efficacité d'un camion de collecte électrique. Pour alléger le document, le lecteur trouvera un tableau synthèse des initiatives mondiales dans le domaine à l'annexe 5. L'attention du lecteur se fera sur quelques projets avec d'importants résultats.

À Cambridge, un camion de collecte conventionnel au diesel consomme en moyenne 45 l/100km. Les coûts liés à la consommation de carburant se chiffrent à plus de 10 000 £ à l'année. Le passage à l'électrique permet de faire des économies sur le long terme. Pour un coût d'achat de 350 000 £ soit 165 000 £ de plus qu'un camion diesel, le camion électrique devient rentable au bout de 17 ans. Le choix de l'électrique n'est donc pas qu'économique pour la ville, c'est surtout pour réduire les émissions polluantes et améliorer la qualité de vie des citoyens. (BBC News, 2020, 22 janvier).

À Rotterdam, un camion électrique est en test depuis avril 2019. Avec une autonomie correspondant au double de son circuit, la compagnie qui opère la collecte mise sur une recharge à chaque jour la nuit. Comme il faut environ 4 heures pour la recharge complète, le camion ne pourra pas se recharger entre deux circuits. (Dimitrova, 2019, 7 juin).

Plusieurs villes américaines commencent à prendre le virage de l'électrique. C'est le cas de la ville de New-York. Le tout premier camion électrique de Mack Truck devrait être livré début 2020. Le camion

sera testé sur plusieurs paramètres de performance : l'autonomie, la capacité de charge utile, les performances du freinage régénératif et la fiabilité de la technologie. (Fleet equipment, 2020).

Depuis 2014, des camions électriques de collecte circulent à Chicago. Les camions sont équipés d'une batterie de 220 kWh leur permettant d'effectuer 128 km, avec une consommation moyenne de 172 kWh/100km. (Air Ressources Board, 2015). Contrairement au camion diesel, les camions électriques s'opèrent avec un coût 10 fois moins élevés (70 \$ US de carburant contre 7 \$ US). (Torontoist, 2016). Les batteries, le moteur et l'électronique ne nécessitent pas d'entretien régulier. Il y a aussi moins de liquide à changer et contrôler. Les rapports d'études réalisés sur les camions de livraison de colis montrent que les économies due à l'entretien sont de l'ordre de 0,15 \$ US par km parcouru. La réduction des coûts de maintenance atteint les 80 %. (Air Ressources Board, 2015). Des économies plus importantes sont attendues pour les camions de classe 8.

À Los Angeles, ce seront des camions de collecte de la marque BYD qui circuleront pour des tests. Chaque camion sera équipé d'une batterie de 188 kWh pour une autonomie d'environ 120 km, soit une consommation de 156 kWh/100km. La batterie au phosphate de fer permet d'obtenir une durée de vie de 5 à 6 ans sur une base d'utilisation régulière, et permet de conserver jusqu'à 70 % de la performance de la batterie après 10 000 cycles, soit environ 1 200 000 km. Les coûts d'entretiens se chiffrent à 0,24 \$ US par km parcouru, soit 50 % d'économie par rapport au diesel. Le prix du camion est de 500 000 \$ US dont 300 000 \$ US destiné au châssis électrique et 200 000 \$ US pour la carrosserie avec l'ensemble des mécaniques de levage et de compactage. (BYD Motors, 2015).

Au niveau des bornes de recharge, les bornes de niveau 2 sont les moins coûteuses avec un coût allant de 2 000 à 6 000 \$ US. Par ailleurs, les bornes de niveau 3 sont très élevées soit environ 50 000 \$ US par station, en supposant qu'il ne faut pas de transformateur supplémentaire. (Air Ressources Board, 2015). Les coûts d'entretien annuels sont relatifs aux coûts d'installation des bornes, soit 300 \$ US pour les niveaux 2 et 1 000 à 2 000 \$ US pour les niveaux 3. (Air Ressources Board, 2015).

D'après une analyse cycle de vie réalisée aux États-Unis, le camion tout électrique ne présente pas un avantage environnemental clair, sauf lorsqu'il est alimenté par un mix énergétique avec une faible émission de GES. Les principales émissions d'un camion électrique sont en phase amont, à l'origine de l'électricité. Les émissions ne sont pas directement émises dans l'environnement. (Zhao et Tatari, 2017).

5.4. Vers les camions à hydrogène

L'hydrogène est principalement produit à partir du méthane d'origine fossile par reformage. Pour produire de l'hydrogène décarboné, il est possible d'utiliser du biométhane. La France prévoit 200 véhicules lourds à l'horizon 2023 selon son plan hydrogène. (Fondation Tuck, 2019).

Le Projet HECTOR consiste au déploiement de 7 camions de collecte à hydrogène dans le nord-est de l'Europe. Il s'inscrit dans une optique de décarbonisation des transports. Le but est de tester les camions de collecte dans leurs conditions normales d'utilisation dans sept villes d'Europe. Certains vont être testés en plein centre-ville et d'autres sur des circuits plus ruraux. (FuelCellsWorks, 2019).

En 2015, un camion de collecte à base de cellule à l'hydrogène a été testé à Honolulu à Hawaï. Pour effectuer son circuit de collecte de 22 km, le camion a consommé 53 kWh pour une consommation de 6,24 kWh/km. La consommation d'hydrogène pour effectuer le circuit a été chiffré à 2,7 kg soit 0,12 kg/km. En tenant compte du coût de l'hydrogène de 6 \$ US/kg, le camion serait rentable au bout de 5 ans d'opération. Le camion était équipé d'une batterie électrique permettant de récupérer l'énergie lors du freinage. (US Hybrid Corporation, 2015).

Une étude réalisée à Bruxelles en 2017 démontre que les camions de collecte à l'hydrogène sont en cours de développement et sont capable d'atteindre la même efficacité que les camions au diesel conventionnels. Un camion entièrement à l'hydrogène a été testé. Il possède une autonomie de 360 km et une consommation entre 6 et 9 kgH₂/100km. Deux camions de 26 tonnes ont circulé dans les rues Eindhoven et Veldhoven au Pays-Bas. La technologie est encore sous l'état de prototype mais elle devrait permettre d'allonger l'autonomie des camions de collecte tout électrique leur permettant de réaliser des circuits de collecte plus long. Actuellement, les principaux freins sont au niveau de l'infrastructure de ravitaillement qui coûte cher et dont les pertes (émissions fugitives) restent encore élevées. Un autre frein réside dans le moyen de production de l'hydrogène : la fabrication d'hydrogène reste très carbonée et les bienfaits climatiques liés à son utilisation sont incertains. (Fuel Cells and Hydrogen, 2017)

Actuellement, l'opération d'un camion de collecte à l'hydrogène coûte en moyenne 5,50 euros/km soit 30 % de plus que son homologue diesel. En termes d'émissions, il n'émet rien en sortie d'échappement hormis de l'eau. Mais la fabrication d'hydrogène en Europe montre une émission jusqu'à 1 kgCO₂eq/km soit quand même 25 % moins que le diesel conventionnel. (Fuel Cells and Hydrogen, 2017).

6. ANALYSE PAR CYLE DE VIE DES TECHNOLOGIES DE COLLECTE

Une analyse sur toute la durée de vie des camions de collecte a été réalisé. Elle s'appuie sur des données issues de la littérature québécoise, canadienne et nord-américaine. Elle suit les principes directeurs de la norme ISO 14064-1 pour les organismes.

6.1 Méthode d'analyse

L'analyse se base sur les principes directeurs de la norme ISO14064-1. Tout d'abord, l'article 3 de la norme permet de définir les émissions. Une émission directe est celle qui découle de l'organisation, dans notre cas, c'est la consommation en carburant pour la collecte et le transport des matières résiduelles. Les émissions indirectes correspondent aux émissions externes à l'organisation : la production et le transport de l'électricité, l'extraction, la fabrication et l'assemblage des matériaux composant les camions de collecte, la maintenance et la fin de vie.

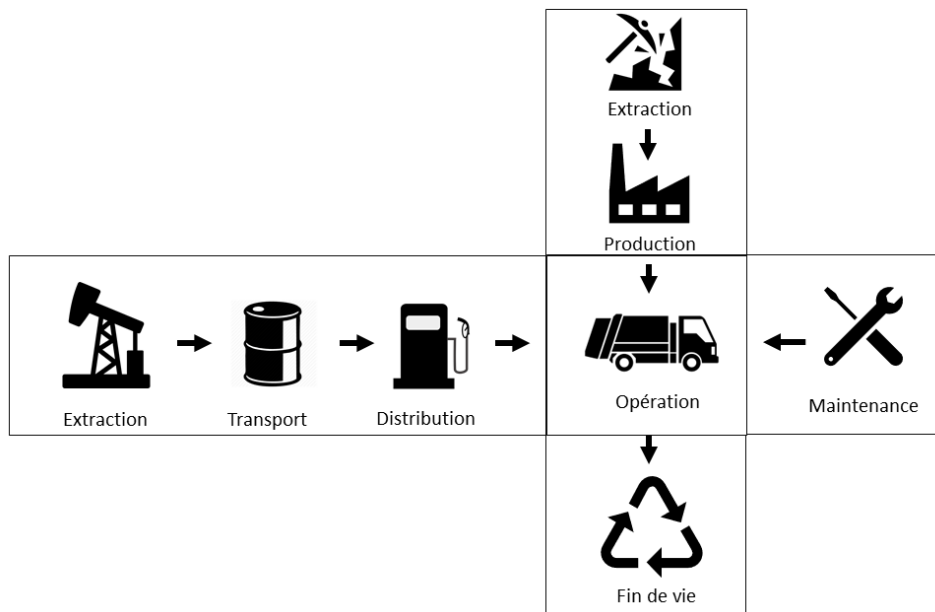


Figure 6.1 Périmètre de l'analyse de cycle de vie

D'après l'article 5 de la norme ISO 14064-1 avant de commencer l'étude, il faut définir le périmètre. La figure 6.1 permet d'illustrer le périmètre de l'étude. Elle se basera sur la collecte et le transport des matières résiduelles à partir de camion de collecte. Elle prendra en compte les émissions dues à la fabrication des camions de collecte, à leur opération, à leur maintenance et finalement à la fin de vie des camions. Au niveau de l'opération, l'étude prendra compte des émissions liées à l'extraction et à la distribution des carburants. Il est important de bien définir chaque source de GES (d'après l'article 6.1

de la norme). Pour chaque étape du cycle de vie, les émissions seront détaillées afin d'éviter une double comptabilisation.

L'article 6.2.2 de la norme donne des conseils pour faire une sélection des données pertinentes : origine reconnue, récente, cohérente avec l'utilisation prévue. Les données qui seront exploitées proviennent de l'inventaire Canadien de 2019, des facteurs d'émission et de conversion du Québec datant de 2019, de la base de données de GHGenius qui repose sur des données canadiennes datant de 2018 et sur la base Exiobase qui repose sur des données d'Amérique du Nord de 2015.

Tableau 6.1 Donnée utilisée pour l'analyse des émissions GES sur l'ensemble du cycle de vie des camions de collecte

	Diésel (L)	B20 (L)	Gaz naturel (kg)	Hybride (L)	Electrique (kWh)	Hydrogène (kg)	Source
Carburant (origine) (gCO₂eq/unité)	0,609	0,544	0,408	0,609	22	0,75	GHGenius, 2020 et Hydro-Québec, 2015
Conversion (gCO₂eq/unité)	2 747	2 692	1 889	2 747	-	-	Environnement et changement climatique Canada, 2019 et Transition Énergétique Québec, 2019a
Ravitaillement perte (gCO₂eq/unité)	-	-	0,032	-	-	-	Argonne National Laboratory, 2014
Maintenance (gCO₂eq/\$)				185			Exiobase, 2015
Maintenance émissions des composants (gCO₂eq/km)	3,8	3,8	3,2	2,8	2,7	2,7	Kawamoto et al., 2019
Construction et assemblage camion (gCO₂eq/kg)	6 357	6 357	14 412	9 218	20 864	9 803	GHGenius, 2020
Construction et assemblage station de ravitaillement (gCO₂eq/\$)	-	-	8 279	-	8 279	8 279	Exiobase, 2015
Fin de vie (hors batterie) (gCO₂eq)				79 205			Bakker, 2010

Tableau 6.1 Donnée utilisée pour l'analyse des émissions GES sur l'ensemble du cycle de vie des camions de collecte (suite)

	Diésel (L)	B20 (L)	Gaz naturel (kg)	Hybride (L)	Electrique (kWh)	Hydrogène (kg)	Source
Batterie Li-ion (gCO₂eq/kg batterie)	-	-	-	-	2 567	-	Compagnie des chemins de fer nationaux du Canada, 2020 et Buchert, et al., 2011
Efficacité de la station de recharge (%)	100%	100%	98%	100%	95%	98%	Argonne National Laboratory, 2014

Le tableau 6.1 permet de faire une synthèse des données utilisées pour l'analyse. L'analyse comprends l'empreinte carbone des carburants de l'extraction jusqu'au réservoir, les émissions lors de la phase d'opération (combustion, maintenance), les émissions pour la construction et la fin de vie des véhicules de collecte. Les données utilisées pour la phase construction/assemblage des stations de ravitaillements se basent sur une méthode d'analyse économique. Ce choix a été fait par manque de données. L'analyse prend en compte l'efficacité de la recharge/ravitaillement pour les technologies et les sensibles pertes possibles lors du transport des carburants. Pour l'ensemble des technologies, une durée de vie de 500 000 km a été utilisé (même si dans la littérature la durée de vie d'un camion électrique est triplée). Les hypothèses ainsi que les données utilisées pour effectuer l'analyse sont détaillés à l'annexe 8.

6.2 Résultat de l'analyse cycle de vie

La comptabilisation des données de GES permet d'obtenir une émission par km parcourue. Comme la durée de vie d'un camion de collecte est d'environ 500 000 km, les émissions fixes (dans notre cas ce sont les émissions indirectes) vont vite être compensé par les émissions variables avec la distance parcourue (la phase d'opération). Plus la distance sera élevée plus les émissions fixes vont être négligeables par rapport aux émissions variables. Le tableau 6.2 présente les résultats de l'analyse pour une distance totale parcourue de 500 000 km.

Tableau 6.2 Résultat de l'analyse cycle de vie des différentes technologies de collecte et de transport

	Diésel	Biodiésel (B20)	Gaz naturel (CNG)	Hybride	Électrique	Hydrogène
Origine carburant (gCO ₂ eq/km)	4,4	3,9	2,9	3,7	27,8	0,05
Opération (gCO ₂ eq/km)	19 778	19 382	13 223	16 812	0	0
Maintenance (gCO ₂ eq/km)	27,8	27,8	25,4	26,9	12,0	142,5
Construction/assemblage (gCO ₂ eq/km)	152,6	152,6	345,9	221,2	500,7	235,3
Fin de vie (gCO ₂ eq/km)	0,2	0,2	0,2	0,2	9,9*	0,2
TOTAL (gCO₂eq/km)	19 963	19 567	13 598	17 064	550	377

* Prends en compte le transport de la batterie vers l'unique centre de recyclage en Colombie-Britannique (293 gCO₂eq/kWh) et un processus de recyclage hydro-métallurgique (2 494 gCO₂eq/kg de batterie).

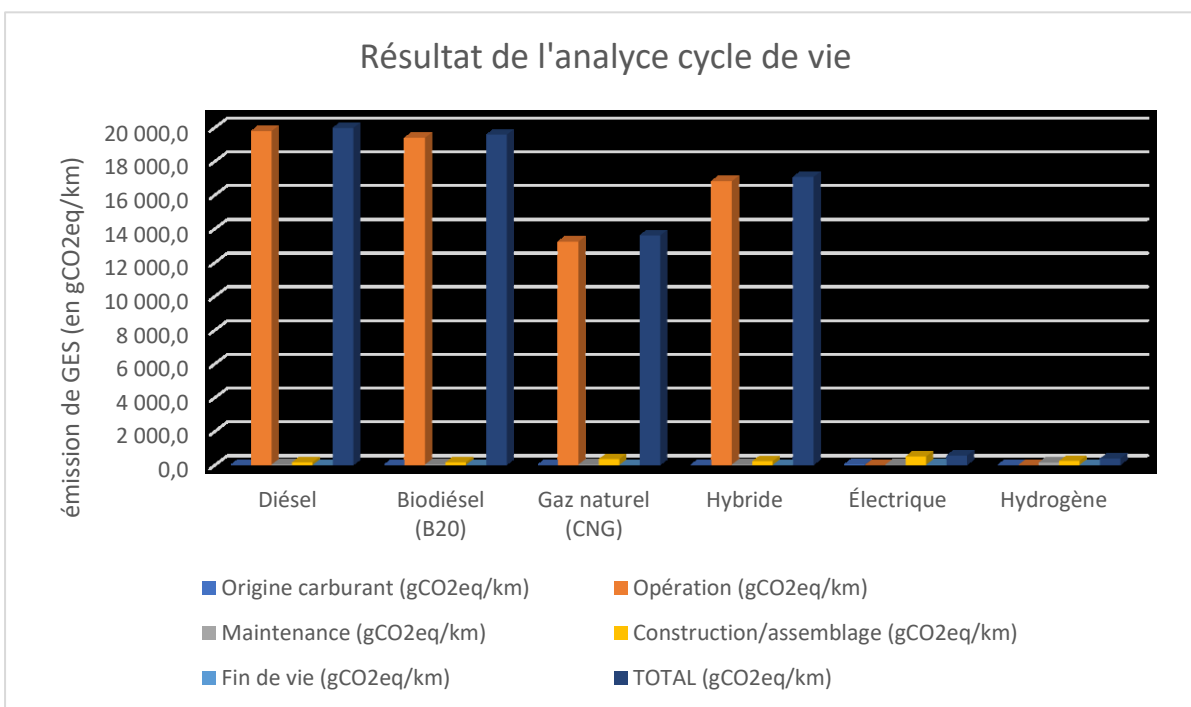


Figure 6.1 Graphique des émissions de GES des différentes technologies de collecte et de transport

Sur le graphique, il est possible de remarquer que la phase d'opération est la plus émettrice de GES pour les camions de collecte conventionnel. Ces émissions auraient pu être encore plus élevée tout dépendamment de la consommation du camion. Pour l'analyse, la consommation la plus basse a été utilisée à savoir 72 l/100km afin de minimiser les écarts possibles avec les autres technologies.

L'utilisation de l'électricité apparaît comme être le meilleur compromis pour réduire les émissions de GES, avec une émission estimée à 550 gCO₂eq/km (pour une distance totale parcourue de 500 000 km). En termes de réduction des émissions de GES, sur l'ensemble du cycle de vie, on atteint une réduction de 2 % pour l'utilisation du biodiésel B20, 15 % pour l'utilisation d'une technologie hybride, 32 % pour l'utilisation du gaz naturel, 98 % pour l'utilisation d'hydrogène, et 97 % pour de l'électricité.

En traçant la réduction des GES par rapport au diesel en fonction de la distance parcourue, il va être possible de déterminer à partir de quelle distance le camion de collecte à énergie verte devient plus écoresponsable que son homologue diesel.

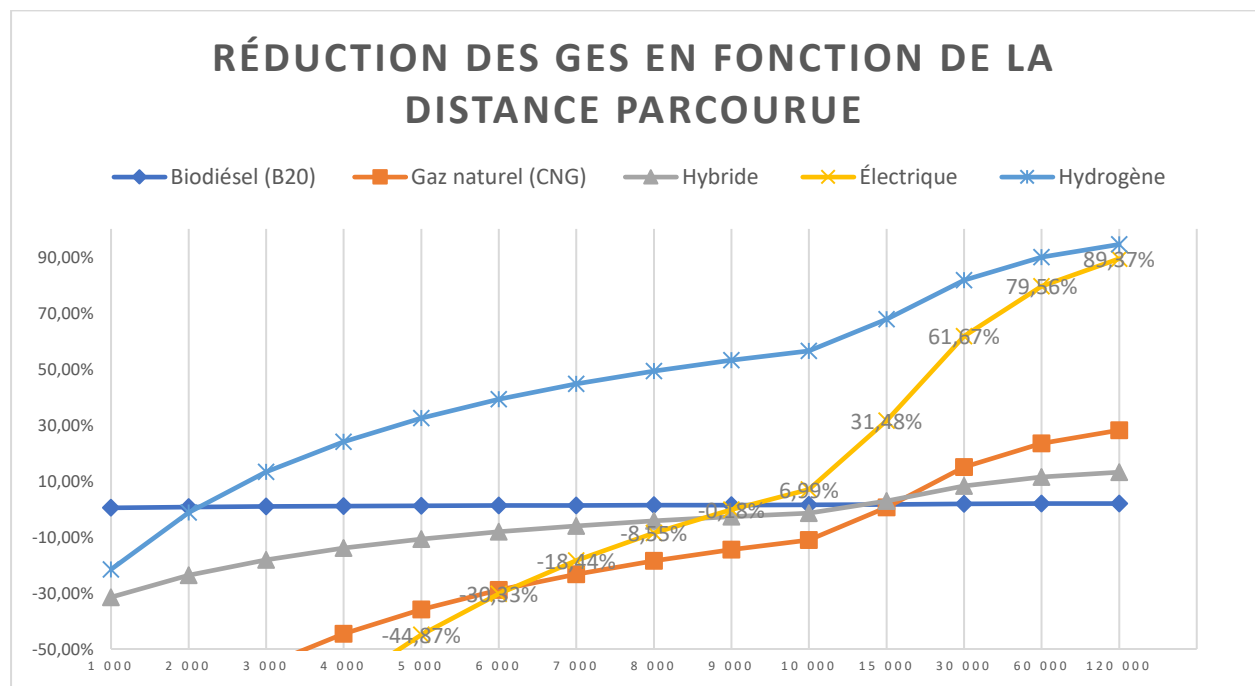


Figure 6.2 Réduction des GES en fonction de la distance parcourue par un camion de collecte par rapport au diesel

Sur la figure 6.2, il est possible de remarquer que le gaz naturel ainsi que la technologie hybride deviennent plus propres que le diesel conventionnel au bout de 15 000 km. L'électrique atteint le cap du diesel à 10 000 km. À la vue des résultats, l'électricité semble être la meilleure solution afin de réduire les GES. Cependant, cette étude est à prendre avec des pincettes vue que la filière de recyclage des batteries électriques est en cours de développement au Québec. Cela permettrait de réduire de 1 035 gCO₂eq/kg de batterie. (Buchert, et al., 2011). De plus, la construction et l'assemblage du camion électrique est fait au Québec qui a un mix énergétique plus sobre en carbone comparativement au Canada.

7. LES GAINS ENVIRONNEMENTAUX ET ÉCONOMIQUES DE L'ÉLECTRIFICATION

Les gains environnementaux et économiques des technologies propres de collecte et de transport seront étudiés à travers cette section par le biais de trois cas concrets : l'agglomération de Montréal, la ville de Sherbrooke et la MRC de Joliette. Avant de commencer l'analyse, une synthèse des données de collecte sera présentée dans le but d'identifier les besoins de ces villes. L'analyse par cycle de vie des différentes technologies de collecte permettra d'identifier les émissions de GES tout au long du cycle de vie des véhicules de collecte afin d'établir des gains environnementaux les plus proches de la réalité. Enfin, une analyse multicritère permettra de faire une comparaison de plus haut niveau des technologies de collecte (diésel, biodiésel, gaz naturel, hybride, électrique, et hydrogène). Pour la technologie hybride, l'étude s'appuie sur les données des camions hybrides circulant aux États-Unis. (Danna, 2011).

7.1. Choix des circuits de collecte simulés

Pour obtenir une comparaison réaliste, l'analyse doit se faire sur des circuits proches de la réalité. Dans cette sous-section, les variables des circuits de collecte vont être documentées (le type de route : semi-urbain, banlieue, la distance du site de dépôt, le nombre de voyages par jour, la durée et distance du circuit).

Au Québec, une petite ville est une ville dont la population est inférieure à 20 000 habitants. Entre 20 000 et 200 000 habitants, il est possible de la considérer comme ville moyenne et au-delà elle est considérée comme grande. (Institut National de Santé Publique du Québec, 2004). Pour faire l'analyse, l'agglomération de Montréal, la ville de Sherbrooke et la MRC de Joliette ont été choisis. Ces villes ont été choisis puisqu'elles respectaient les contraintes à savoir : les données de la collecte sont facilement disponibles pour les trois voies (déchet, recyclage et organique), les données intègrent le nombre et le type de logement, le centroïde, les tonnages produits, une carte du secteur, l'adresse des centres de traitement, une densité proche d'une ville urbanisée, semi-urbanisée et rural. Le tableau 7.1 est une synthèse des données collectées et qui vont être exploitées afin de poser un cadre réaliste à notre analyse des gains. Les détails des calculs sont disponibles à l'annexe 6.

Tableau 7.1 Synthèse des données de la collecte des villes étudiées (compilation d'après : Ville de Montréal, 2019, Ville de Sherbrooke, 2016, MRC de Joliette, 2018)

	Agglomération de Montréal, 2019	Ville de Sherbrooke, 2016	MRC de Joliette, 2019
Densité de population (hab./km ²)	4 140	435	156
Distance de collecte (km)	10 100	1 100	835
Nombre de porte	1 243 289	44 128	20 835
Vitesse moyenne de collecte (km/h)	3,4	9	15
Statistique à l'année			
Déchet			
Nombre de collecte	52	15	26
Tonnage (tonnes)	929 798	28 811	26 386
Coût de la collecte/transport (\$)	146 908 084 \$	835 915 \$	1 149 882 \$
Nombre de camion	183	10	6
Distance parcourue (km)	3 934 459	57 659	97 099
par camion (km)	21 500	5 766	16 183
Recyclage			
Nombre de collecte	52	28	52
Tonnage (tonnes)	432 385	16 148	7 241
Coût de la collecte/transport (\$)	68 316 830 \$	2 098 717 \$	1 121 821 \$
Nombre de camion	133	7	3
Distance parcourue (km)	2 110 612	53 869	58 936
par camion	15 869	7 696	19 645
Matière organique			
Nombre de collecte	52	38	39
Tonnage (tonnes)	95 329	14 479	8 509
Coût de la collecte/transport (\$)	15 061 982 \$	730 263 \$	571 381 \$
Nombre de camion	95	7	3
Distance parcourue (km)	874 740	134 879	56 876
par camion	9 208	19 268	18 959

La vitesse moyenne de collecte est calculée avec une estimation du temps de collecte 8 secondes pour une maison unifamiliale et 16 secondes pour un multi-logement. Selon une étude faite à Montréal, il faut plus de temps pour collecter un multi-logement qu'une maison unifamiliale, le temps de collecte varie de 5 à 28 secondes. (Lagneau, 2018). La distance de collecte divisée par le temps estimé permet d'obtenir la vitesse moyenne de collecte.

La distance parcourue à l'année est calculée suivant la distance de collecte, la distance entre le centroïde et le centre de traitement, le nombre de trajet à réaliser pour vider les camions multipliés par le nombre de collecte dans l'année. Par exemple, pour la MRC de Joliette, la distance parcourue en

moyenne pour une collecte de déchet est de 3 735 km, cela représente 97 099 km à l'année. (Voir annexe 6.)

Les coûts de collecte et de transport correspondent uniquement aux matières collectées. Les données proviennent des bilans de gestion des matières résiduelles des villes. Ils ne prennent pas en compte les collectes spéciales comme les encombrants ou les résidus domestiques, sapin de Noël, etc. Sauf pour la MRC de Joliette, les coûts pour la collecte et le transport proviennent de M. Mario Laquerre (Directeur de projet spéciaux en GMR pour la MRC de Joliette).

L'agglomération de Montréal est composée de 19 arrondissements, de 954 683 logements et 2 millions d'habitant. Elle possède 5 collectes porte-à-porte (recyclables, matières organiques, résidus verts, CRD et ordures ménagères) ce qui représente plus de 7,5 millions de km par année. L'île bénéficie d'un centre de tri, de 4 centres de compostage, et de 6 lieux d'enfouissements techniques. Le coût de la collecte est en moyenne de 158 \$/tonne en 2018. L'agglomération de Montréal souhaite dans un futur proche aller vers l'utilisation de camion de collecte à faible taux d'émission ou électrique. Elle devrait exiger prochainement la production d'un plan de réduction de GES sur la durée des contrats de collecte accordés, et maximiser les circuits pour réduire les distances parcourues. De plus, elle a émis des lois et règlements relatifs à la pollution et au bruit : les collecteurs doivent prendre les mesures nécessaires pour minimiser la pollution et le bruit générés par l'exécution de leurs travaux. Les ordures ménagères sont envoyées sur le site de Complexe Enviro Connexions Itée à Terrebonne (39 %), EBI à Saint-Thomas (37 %) et Waste Management à Sainte-Sophie (20 %). (Ville de Montréal, 2019). La présence de poste de transbordement à proximité de chaque arrondissement permet de réduire les distances parcourues par les bennes de collecte. Les camions doivent effectuer 22 km en moyenne afin de livrer son chargement. (Lagneau, 2018). Pour l'agglomération de Montréal, il est possible d'estimer les coûts liés à la collecte et au transport des matières résiduelles (déchets, recyclables, matières organiques), cela représente un coût de 33,28 \$/km (coût total de la collecte et transport divisé par la distance totale parcourue).

La ville de Sherbrooke se découpe en 6 arrondissements. Le plus dense est celui du Mont-Bellevue avec une densité de 1 126 hab./km, la moyenne est située à 435,5 hab./km². (Ville de Sherbrooke, 2016). La ville de Sherbrooke possède un réseau routier d'environ 1 100 km (hors autoroute). (Ville de Sherbrooke, 2020). Au total, sur une année, la ville offre 15 collectes de déchets, 28 de recyclage et 38 d'organiques. Les coûts de collecte sans les bénéfices marginaux et les frais d'administration varient entre 29 \$/tonne pour les déchets à 130 \$/tonne pour le recyclage. (Ville de Sherbrooke, 2016). D'après les appels d'offres de 2018 pour la collecte des matières recyclables et organiques, et celui de 2008 pour

les déchets, l'ensemble des matières (déchets, recyclables et organiques) doit être transporter au centre de tri de Récup-Estrie, où une plateforme de transbordement attends les déchets. La matière organique est transférée par le même camion de collecte au site de Burry à 45 km du centre de transbordement. En moyenne, 65 % des bacs bruns sont collectés lors d'une collecte. Sur trois collectes de matière organique, 7 camions ont parcouru ensemble 8 500 km et collecté 70 000 bacs pour 1 430 tonnes. Cela correspond à des circuits pour une collecte par camion de 404 km, 3 333 bacs et 68 tonnes. En considérant qu'un camion a une charge maximale de 12 tonnes (Lagneau, 2018), chaque camion a dû faire en moyenne 6 voyages entre la zone de collecte et le centre de transfert. Cela correspond à 67 km en moyenne par circuit avant vidage, et 555 levées. Dans l'appel d'offres pour la collecte des matières recyclables, il est indiqué qu'il faut en moyenne 6,5 camions pour effectuer la collecte, et que chaque camion lève en moyenne 842 bacs par circuits. D'après ce document, chaque semaine c'est 21 900 bacs qui sont collectés, cela fait une moyenne de 3 370 bacs par camion, soit au minium 4 voyages vers le centre de tri par camion chaque semaine. Pour la ville de Sherbrooke, il est possible d'estimer les coûts liés à la collecte et au transport des matières résiduelles (déchets, recyclables, matières organiques), cela représente un coût de 14,87 \$/km (coût total de la collecte et transport divisé par la distance totale parcourue).

La MRC de Joliette est composée à 78 % de zone agricole. La zone urbaine se concentre sur les centres-villes. La plus grosse concentration se situe à Joliette, où la densité de la population grimpe à 861 hab./km² (la moyenne dans la MRC de 156 hab./km²). La MRC possède un réseau routier de 835 km. Dans le centre-ville de Joliette, la collecte s'effectue de manière semi-mécanisée et le nombre de collecte des matières organiques est augmenté (de 39 à 52). (MRC de Joliette, 2019). Dans le cadre de notre étude, l'hypothèse faite est que le nombre de collecte soit identique à travers l'ensemble de la MRC. Le coût de la collecte et du transport des matières résiduelles varie entre 47 \$/tonne (pour les déchets) et 190 \$/tonne (pour le recyclage). (MRC de Joliette, 2019). Les déchets sont collectés et envoyés au LET de EBI Environnement à Saint-Thomas. Les matières organiques sont envoyées sur la plateforme de compostage de EBI Environnement à Saint-Thomas. Les matières recyclables sont envoyées au centre de tri sur la rue Raoul-Charette. (MRC de Joliette, 2019). Pour la MRC de Joliette, il est possible d'estimer les coûts liés à la collecte et au transport des matières résiduelles (déchets, recyclables, matières organiques), cela représente un coût de 13,35 \$/km (coût total de la collecte et transport divisé par la distance totale parcourue).

7.2. Critère d'évaluation et pondération

Les critères d'évaluation ont été choisis dans le but d'être représentatifs de la réalité de la collecte et du transport des matières résiduelles. Ils sont classés par sphère du développement durable (économique, environnementale, sociale). Le nombre de critères a été limité à 11 afin de faciliter la lecture et éviter les redondances possibles. Les émissions de GES et les autres polluants atmosphériques sont comptabilisés à la fois dans la sphère économique et environnementale. Le but est de montrer au lecteur que les impacts environnementaux ont un coût pour la société.

La pondération suit une échelle de 1 à 5 pour marquer une différence nette entre le contexte de l'étude (milieu urbain, périurbain, rural). Pour chaque critère, la pondération évalue l'importance de l'aspect soulevé par le critère par le domaine municipal. L'échelle est la suivante :

- 1 l'aspect est négligeable pour le domaine municipal;
- 2 l'aspect a une faible importance (il arrive d'en parler dans les discussions, mais peu intégré lors des appels à projets);
- 3 l'aspect est moyennement considéré (intégré dans certains cas/appels à projets);
- 4 l'aspect est important pour le domaine municipal (utilisé dans les discussions et fortement intégré dans certains cas/appels à projets);
- 5 l'aspect est primordial dans les discussions et dans l'analyse de cas/appels à projets.

Pour chacun des critères, la pondération peut être différente suivant le contexte (milieu urbain, périurbain, rural). Cela permet de réaliser une analyse la plus proche possible de la réalité du terrain. Par exemple, un milieu très urbain comme Montréal aurait plus tendance à maximiser les critères liés à la santé de la population et le bien-être social car la ville est plus sujette au smog. Alors qu'en contexte rural, la pollution de l'air aura tendance à être oubliée puisqu'elle aura le temps de se dissiper. Le tableau 7.2 synthétise les critères et la pondération attribué pour chacun des contextes. À la suite du tableau, les critères ainsi que leurs pondérations seront brièvement justifiés.

Tableau 7.2 Liste des critères et leurs pondérations

Critère	Urbain	Péri-Urbain	Rural
Économique			
Investissement à l'achat (avec subvention)	3	4	5
Frais d'exploitation (énergie et maintenance)	4	4	5
Coûts pour la société (lié aux émissions atmosphériques : GES, NOx, COV, etc.)	2	1	1
Technique			
Autonomie	3	4	5
Flexibilité/fiabilité	2	3	4
Expertise/retour d'expérience (disponibilité de la technologie)	2	2	3
Environnement			
Émission de GES	3	2	1
Gestion en fin de vie	2	1	1
Social			
Environnement de travail (bruit, émissions polluantes)	3	2	2
Image véhiculée (chez les citoyens et les clients)	2	1	1
Impact sur la santé humaine (COV, Nox, HAP, particules, etc.)	3	2	1
TOTAL	19	20	21

Investissement à l'achat (avec subvention) :

Le coût à l'achat d'un camion de collecte influence directement le choix d'une technologie. Même si les nouvelles technologies vertes comme l'hybride ou le camion tout électrique de LION est subventionné jusqu'à 75 000 \$, le surcoût par rapport à un véhicule standard reste élevé. (Ministère des Transports, 2019). Pour l'évaluation des gains, l'investissement à l'achat prendra en compte l'achat du véhicule et des stations de recharge/ravitaillement. Pour les grandes municipalités, les coûts d'investissements ne devraient pas avoir un grand impact puisqu'elles possèdent un fond de roulement suffisamment grand pour amortir les dépenses. Mais pour les petites municipalités, les budgets sont plus resserrés.

Frais d'exploitation (énergie et maintenance) :

Les frais d'exploitation seront calculés selon la consommation de carburant et sur le coût de maintenance. Généralement, les frais d'exploitation pourront être exprimés par km, ou par année. Les frais d'exploitation sont importants pour les gestionnaires, indépendamment du contexte. C'est ce qui définit les coûts de la collecte et du transport des matières résiduelles, qui seront répartis sur l'ensemble des citoyens. Pour les bénéfices des citoyens, les frais d'exploitation doivent être les plus bas. Pour une petite municipalité qui s'appuie sur une plus faible population, des frais d'exploitation trop élevés ne seront pas admissibles. C'est le critère majeur dans les appels d'offres. Cependant, des frais d'exploitation plus hauts pour une grande ville pourraient plus facilement passer, vu la plus haute densité de population, l'augmentation des coûts individuels pour les citoyens serait négligeable.

Coûts pour la société (GES, Nox, COV, etc.) :

Pour tenir compte des impacts économiques liés à la pollution de l'air, le critère coûts pour la société permet de transformer les émissions en un coût économique afin de rendre cela plus visuel pour le domaine municipal. Pour les GES, le calcul se base sur une tarification de 40 \$/tCO₂eq. Ce chiffre est sujet à augmentation dans les années futures (en 2022, 50 \$/tCO₂eq, pour le transport le coût est estimé à une variation de 60 à 100 \$/tCO₂eq). (Bureau du directeur parlementaire du budget, 2016 et Bureau du directeur parlementaire du budget, 2019). Pour les émissions polluantes, le critère tient compte des émissions de PM (particules), NO_x (oxyde d'azote), CO (monoxyde de carbone) et O₃ (ozone dû au smog photochimique). Le calcul est simple, en 2015, l'utilisation des hydrocarbures au Québec a engendré des coûts pour la société de 3,1 millions de dollars. En tenant compte du volume d'hydrocarbure brûlé dans le secteur du transport, il est possible d'obtenir des coûts au litre de diesel. Puis en utilisant les données d'émissions des moteurs, il est facile d'obtenir un coût pour chaque polluant au gramme émis. (Institut national de santé publique, 2018, Santé Canada, 2017 et Whitmore, Pineau, 2018). Ce coût est de l'ordre du 0,010 cent par gramme pour chacun des polluants, sauf pour les PM où il atteint 17,28 cents par gramme.

Actuellement, cet aspect est peu regardé dans le domaine municipal. Mais outre-Atlantique, où la pollution de l'air des grandes métropoles est devenue un enjeu majeur, cet aspect est fortement pris en compte. Dans l'analyse, l'hypothèse est que les coûts pour la société seront un aspect très regardé dans les grandes municipalités où la densité de population est plus importante. Pour une municipalité rurale, elle sera vite négligée car la pollution sera très diffuse et aura moins d'impact.

Autonomie :

L'autonomie est souvent l'aspect le plus critiqué sur les véhicules électriques. Ce critère va venir tester si les véhicules sont capables d'effectuer les circuits de collecte tout dépendamment du contexte (urbain, périurbain, rural). Il va venir statuer de manière très subjective si le camion permet d'opérationnaliser la collecte. L'autonomie du camion sera analysée selon les besoins des circuits. Habituellement, il est courant de demander une autonomie d'au moins le double de la distance à parcourir par le véhicule pour lui permettre de revenir à la station de recharge. Une autonomie inférieure à celui nécessaire pour réaliser un circuit demandera des camions supplémentaires afin d'effectuer le circuit, ce qui risque d'augmenter les coûts. L'autonomie est un aspect important pour un circuit rural où les distances sont plus grandes et les arrêts moins nombreux. Pour les circuits urbains, l'autonomie est un peu moins importante considérant leurs plus faibles distances.

Flexibilité/fiabilité :

Ce critère analyse la capacité d'adaptation de la technologie, il sera qualitatif. Par exemple, la batterie des véhicules électriques est altérée par le froid de l'hiver : perte d'autonomie, consommation supplémentaire. Le critère se basera sur la modification de l'exécution des journées de collecte : rallongement du temps, risque de panne sur circuit, etc. Pour les municipalités rurales, c'est un aspect à non négliger car elles sont sujettes à beaucoup de contraintes et peu de ressources (plaintes qui peuvent remonter si la collecte n'a pas eu lieu à temps). Dans un contexte urbain, la flotte étant plus conséquente, le service de collecte est d'autant plus flexible.

Expertise/retour d'expérience :

Ce critère permet d'évaluer la présence de la technologie sur le territoire québécois. Une technologie éprouvée et approuvée par les collecteurs privés du Québec sera plus acceptée par le domaine municipal. Un contexte urbain offre plus de flexibilité pour le test d'une technologie puisque la flotte est plus conséquente et offre ainsi plus de flexibilité. Alors que dans un contexte rural, il est préférable que la technologie soit testée et approuvée.

Émission de GES :

Le critère d'émission de GES permet de comptabiliser les émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie des véhicules. L'analyse de cycle de vie a été réalisée dans la section suivante, elle prend compte des émissions lors des phases suivantes : construction, assemblage, opération, fin de vie. L'analyse cycle de vie permet d'obtenir des données d'émissions en gCO₂eq/km, pour une durée de vie des véhicules étudiées de 500 000km. Dans un contexte où le Québec s'est doté d'un plan d'action pour lutter contre le réchauffement climatique, cet aspect est important pour l'ensemble des territoires (urbain comme rural). Mais, il prend plus de sens dans un contexte urbain où la flotte est plus conséquente et la communication sur les actions pour lutter contre les changements climatiques sont plus diffusées.

Gestion en fin de vie :

Pour tenir compte des impacts réels des véhicules étudiées, il faut considérer la gestion en fin de vie. Actuellement, le Québec ne dispose pas d'un système de récupération et de recyclage des batteries au lithium présentes dans les véhicules électriques. Les batteries sont le plus souvent envoyées en Colombie-Britannique pour être traitées. (Propulsion Québec, 2019a). L'évaluation sera réalisée suivant la présence ou non d'une filière de recyclage/réemploi, et de son efficacité actuelle. Elle prendra en compte la présence ou non de matériaux sensibles à traiter, des coûts possibles supplémentaire pour effectuer le recyclage. Cet aspect commence à être intégré dans les projets du domaine municipal mais il est plus facile d'en tenir compte lorsque la flotte est plus importante.

Environnement de travail :

L'environnement de travail permet d'évaluer d'une part l'évolution du milieu de travail du chauffeur et d'autre part celui du citoyen, le client final du service de collecte. Pour le milieu de travail du chauffeur, l'analyse sera faite sur le silence du véhicule lors de sa phase de collecte et de transport, et sur les émissions polluantes pouvant porter atteinte à la santé des employés. Au niveau du citoyen, l'analyse sera dirigée vers le silence du service de collecte permettant de réduire les risques d'accident et les nuisances sonores. La santé et sécurité au travail, la santé et la qualité de vie des citoyens sont des aspects importants pour les employeurs et pour le domaine municipal. (CIRAIG, 2007). En contexte urbain, la circulation est plus importante ce qui augmente les risques liés à l'utilisation d'un équipement bruyant, de plus la forte densité de population augmente les risques de plainte pour les nuisances sonores provoqués par la collecte. L'hypothèse faite est qu'en contexte rural, ce phénomène serait atténué, puisque les habitations sont plus éloignées des routes.

Image véhiculée :

Ce critère est très qualitatif. Il permet de qualifier l'appréciation de la technologie par le grand public et par les clients. L'hypothèse faite est qu'en zone urbaine le grand public et les clients sont plus sensibles aux technologies vertes que dans un contexte rural.

Impact sur la santé humaine (COV, Nox, etc.) :

Selon une étude menée en 2007 par le CIRAIG, les critères touchant à la santé et la qualité de vie des citoyens sont importants pour les élus. (CIRAIG, 2007). Ce critère pourrait être considéré comme redondant avec les coûts économiques pour la société. Mais il est plus d'ordre qualitatif, l'objectif est de montrer qu'il ne faut pas oublier de prendre en considération les potentiels impacts sur la santé des employés et des citoyens. Une émission faible en NOx, COV, HAP, particules réduit les risques de cancer pour les employés et les citoyens. Il est estimé que l'exposition professionnelle aux émissions de moteur diesel provoque chaque année au Canada 2,4 % des cancers diagnostiqués. Les travailleurs du secteur du transport sont représentés à 23 %. (Institut de recherche en santé et sécurité du travail [IRSST], 2017). Cet aspect sera plus considéré dans un contexte urbain où la santé des citoyens est plus sujette aux smogs, alors que dans un cadre rural, la dispersion du smog est plus efficace et la densité de population est moindre.

7.3. Évaluation des gains

Les technologies de collecte et de transport des matières résiduelles seront analysées suivant les critères présentés dans la section précédente. Avant de faire l'analyse, le lecteur trouvera les données de l'étude sur lesquelles s'appuie l'analyse. Ces données proviennent de la littérature et sont explicitées dans les chapitres 4 et 5. Une analyse de cycle de vie synthétique a été réalisée dans le but de compiler des données d'émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie des technologies. Avant d'entamer une analyse multicritère, le lecteur trouvera une analyse des gains pour les cas étudiés (l'agglomération de Montréal, la ville de Sherbrooke, et la MRC de Joliette).

7.3.1. Les données de l'étude pour les différents carburants

L'analyse des gains économiques et environnementaux se basera sur les données de l'analyse de cycle de vie pour les émissions de GES et sur les données compilées dans les chapitres 4 et 5. Les données utilisées sont présentées à l'annexe 9.

7.3.2. Simulation des gains économiques et environnementaux

La simulation des gains économiques et environnementaux permet de visualiser, suivant les critères définis plus haut, l'impact de la collecte. L'utilisation de cas concret permet de montrer au domaine municipal les coûts engendrés par les différentes technologies par rapport à leurs données. Les données utilisées pour réaliser cette analyse se trouvent en annexe 9. Pour la technologie hybride, l'étude s'appuie sur les données des camions hybrides circulant aux États-Unis. (Danna, 2011).

L'analyse se base sur le nombre de camions nécessaire pour réaliser les collectes. Pour faciliter les calculs, le nombre de camions maximum pour les services de collecte a été utilisé. Par exemple, l'agglomération de Montréal aurait besoin d'environ 183 camions pour le déchet, 133 pour le recyclage et 95 pour la matière organique, le calcul s'est basé sur le nombre maximal de camions nécessaire à savoir 183 camions.

L'analyse tient compte du nombre de kilomètres à parcourir pour l'ensemble de la collecte (les trois services sont compilés) sur une année d'opération. Par exemple, la distance totale parcourue par les véhicules de collecte a été estimée à 7,5 millions de km pour l'Agglomération de Montréal pour 5 services de collecte (Ville de Montréal, 2019). Dans notre cas, la distance totale parcourue a été estimée à 6,9 millions de km (pour les 3 services : déchet, recyclage, matière organique). La distance effectuée par chacun des camions a été négligée par cette analyse. Dans notre cas, l'hypothèse choisie est que chacune des technologies permet d'opérationnaliser la collecte sans aucun problème et sans avoir besoin de surdimensionner la flotte. Cet aspect sera critiqué par la suite dans l'analyse multicritère (avec le critère autonomie).

Tableau 7.3 Gains environnementaux et économiques pour les cas étudiés

	Diésel	Biodiésel (B20)	Gaz naturel (CNG)	Hybride	Électrique	Hydrogène
Agglomération de Montréal						
Investissement total (M\$)	45,75 M\$	45,75 M\$	63,14 M\$	56,55 M\$	114,69 M\$	164,70 M\$
Frais d'exploitation (M\$/an)	66,17 M\$	63,08 M\$	50,14 M\$	56,38 M\$	1,24 M\$	7,27 M\$
Retour sur investissement (an)	Référence		1,08	1,10	1,06	2,02
Coût pour la société (M\$/an)	5,54 M\$	5,42 M\$	3,76 M\$	4,73 M\$	0,15 M\$	0,10 M\$
GES émis (tCO ₂ eq/an)	138 143	135 399	94 093	118 077	3 808	2 608

Tableau 7.3 Gains environnementaux et économiques pour les cas étudiés (suite)

	Diésel	Biodiésel (B20)	Gaz naturel (CNG)	Hybride	Électrique	Hydrogène
Ville de Sherbrooke						
Investissement total (M\$)	2,50 M\$	2,50 M\$	3,45 M\$	3,09 M\$	6,27 M\$	9,00 M\$
Frais d'exploitation (M\$/an)	2,36 M\$	2,25 M\$	1,79 M\$	2,01 M\$	0,04 M\$	0,26 M\$
Retour sur investissement (an)	Référence		1,67	1,69	1,63	3,10
Coût pour la société (\$/an)	197 098 \$	193 047 \$	133 928 \$	168 466 \$	5 429 \$	3 722 \$
GES émis (tCO ₂ eq/an)	4 912	4 814	3 346	4 198	135	93
MRC de Joliette						
Investissement total (M\$)	1,50 M\$	1,50 M\$	2,07 M\$	1,85 M\$	3,76 M\$	5,40 M\$
Frais d'exploitation (M\$/an)	2,04 M\$	1,94 M\$	1,54 M\$	1,73 M\$	0,04 M\$	0,22 M\$
Retour sur investissement (an)	Référence		1,16	1,18	1,13	2,15
Coût pour la société (\$/an)	170 555 \$	167 049 \$	115 892 \$	145 779 \$	4 698 \$	3 221 \$
GES émis (tCO ₂ eq/an)	4 250	4 166	2 895	3 633	117	80

En analysant le tableau 7.3, il est possible de remarquer que l'investissement pour une technologie propre se rentabilise sur le moyen terme en moins de 3 ans. Cela s'explique par le faible coût des carburants verts comparativement au diésel. Les économies réalisées sur l'opération sont considérables pour chacun des cas. Dans notre cas, l'hypothèse faite qu'un camion conventionnel a une consommation moyenne de 72 l/100km vient réduire les frais d'exploitation, mais il est possible d'imaginer qu'une consommation supplémentaire vienne renforcer les gains économiques possibles des carburants verts. Pour l'ensemble des cas, les coûts pour la société sont principalement composés de la compensation carbone. Ce n'est que pour le cas de l'agglomération de Montréal où les émissions polluantes représentent 17 500 \$/année (cas du diésel). L'utilisation de gaz naturel permet de réduire ce coût à 3 000 \$/année, et l'électricité permet d'atteindre un coût inférieur à 500 \$/année (voir annexe 9).

Pour la ville de Sherbrooke et la MRC de Joliette, les émissions de GES sont du même ordre de grandeur. L'utilisation de carburant vert permet de couper jusqu'à 97 % les émissions de GES de la collecte (électricité), et jusqu'à 32 % pour le gaz naturel.

Au niveau de l'opération sans prendre en compte l'investissement initial en capital, l'utilisation du diesel a un coût d'environ 9,56 \$/km. Le passage à l'électrique permet de faire des économies de 9,38 \$/km (0,18 \$/km pour l'électrique). En tenant compte de l'investissement initial avec les subventions accordés, le diesel est le plus économique avec un coût de 16,61 \$/km comparativement à l'électrique de 17,84 \$/km (augmentation de 7%).

En se concentrant sur l'utilisation de l'électricité, pour l'agglomération de Montréal, cela correspondrait à un investissement supplémentaire de 68,93 M\$ qui se rentabilise en moins de 2 ans (gain de 64 M\$ en frais d'exploitation par année) et qui permettrait de sauver 134 334 tCO₂eq par année. Cela revient à un coût à la tonne de 513 \$. Au niveau de la pollution atmosphérique, le passage à l'électricité permettrait de réaliser un gain de 17 000 \$ pour la société à l'année. (Voir le tableau en Annexe 9 pour plus de détails). En revenant sur les coûts estimés à la section 7.1, à savoir 33,28 \$/km pour la collecte et le transport des matières résiduelles, le passage à l'électricité permettrait de réduire ce coût à 23,90 \$/km, soit 165 M\$/an (comparativement au 230 M\$/an actuellement).

En se concentrant sur l'utilisation de l'électricité, pour la ville de Sherbrooke, cela correspondrait à un investissement supplémentaire de 3,77 M\$ qui se rentabilise au bout de 2 ans (gain de 2,31 M\$ en frais d'exploitation par année) et qui permettrait de sauver 4 776 tCO₂eq par année. Cela revient à un coût à la tonne de 789 \$. Au niveau de la pollution atmosphérique, le passage à l'électricité permettrait de réaliser un gain de 622 \$ pour la société à l'année. (Voir le tableau en Annexe 9 pour plus de détails). En revenant sur les coûts estimés à la section 7.1, à savoir 14,87 \$/km pour la collecte et le transport des matières résiduelles, le passage à l'électricité permettrait de réduire ce coût à 5,49 \$/km, soit 1,35 M\$/an (comparativement au 3,66 M\$/an actuellement).

En se concentrant sur l'utilisation de l'électricité, pour la MRC de Joliette, cela correspondrait à un investissement supplémentaire de 2,26 M\$ qui se rentabilise au bout de 2 ans (gain de 2 M\$ en frais d'exploitation par année) et qui permettrait de sauver 4 133 tCO₂eq par année. Cela revient à un coût à la tonne de 547 \$. Au niveau de la pollution atmosphérique, le passage à l'électricité permettrait de réaliser un gain de 527 \$ pour la société à l'année. (Voir le tableau en Annexe 9 pour plus de détails). En revenant sur les coûts estimés à la section 7.1, à savoir 13,35 \$/km pour la collecte et le transport des matières résiduelles, le passage à l'électricité permettrait de réduire ce coût à 3,97 \$/km, soit 0,85 M\$/an (comparativement au 2,84 M\$/an actuellement).

L'électrification de la collecte pour l'agglomération de Montréal montre un coût d'économie d'émission de GES le plus bas des trois cas étudiés. Mais la réduction des émissions de GES ne serait pas le seul

argument pour le passage à l'électrique, il faut s'appuyer également sur les faibles frais d'exploitation (soit dix fois moins en moyenne que le diesel conventionnel) et sur un retour sur investissement très rapide (en moyenne de 2 ans).

Pour obtenir une analyse plus critique et de plus haut niveau de l'électrification de la collecte, une analyse multicritère a été réalisée. Les critères utilisés sont explicités à la section 7.2. L'échelle d'évaluation et les justifications des notes attribuées pour chaque critère sont présentées à l'annexe 10. Les résultats de l'analyse multicritère sont présentés à la section suivante.

7.4. Prise de position

L'analyse multicritère a permis de classer les technologies les plus adaptées à chacun des contextes (urbain, périurbain et rural). Les résultats de cette analyse sont présentés au tableau 7.4.

Tableau 7.4 Synthèse des résultats de l'analyse multicritère sous forme de pourcentage

Contexte	Diésel	Biodiésel (B20)	Gaz naturel (CNG)	Hybride	Électrique	Hydrogène
Urbain	52 %	61 %	68 %	61 %	74 %	72 %
Péri-Urbain	61 %	67 %	69 %	63 %	69 %	67 %
Rural	69 %	71 %	70 %	66 %	65 %	65 %

Plus le pourcentage est élevé, plus la technologie s'adapte bien au contexte. Les résultats montrent que l'électrification de la collecte se porte mieux dans un contexte urbain. En effet, les avantages de la technologie à savoir la réduction des émissions de GES, l'absence de bruit lors du fonctionnement, la quasi-absence d'émissions de polluant (zéro émission au niveau des COV, HAP, NOx, CO mais encore une faible présence de particules due à l'usure normale des freins et des pneus), fait du camion électrique le plus adapté au contexte urbain.

Par ailleurs, dans un contexte périurbain, le camion électrique arrive à la même position que celui roulant au gaz naturel. L'ensemble des contraintes du camion électrique (investissement à l'achat, autonomie, fiabilité en hiver, flexibilité de la technologie, absence de retour d'expérience de la technologie au Québec) compense les avantages du camion électrique (faible frais d'exploitation, faible émission de GES).

Finalement, pour un contexte rural, l'utilisation de biodiésel B20 peut être considérée comme le meilleur moyen actuellement, suivie de très près par le camion au gaz naturel. La seule contrainte liée au gaz naturel est le manque de station de ravitaillement publique.

8. OPÉRATIONNALISATION D'UNE COLLECTE ÉLECTRIQUE

Les camions électriques possèdent des contraintes qui limitent son développement au Québec. L'analyse multicritère a montré qu'il s'adapte mieux dans un contexte urbain qu'un contexte rural. Cependant, pour pallier ses contraintes et développer son utilisation, il existe des actions à mettre en place. Cette section, le lecteur trouvera des préalables pour faciliter la transition énergétique.

8.1. Des préalables logistiques

Pour améliorer l'électrification de la collecte et du transport des matières résiduelles, il faut pouvoir réduire les contraintes liées à l'utilisation d'un camion tout électrique. D'un point vu logistique, cela passe par l'optimisation de son autonomie. Le camion LION tout électrique a une autonomie maximum de 400 km, elle est pour le moment que théorique. En hiver, le froid réduit les performances des batteries lithium-ion d'environ 25 % pour une température de -15 °C jusqu'à 45 % à -25 °C. (CAA-Québec, 2020b). Cependant, ces données proviennent d'études réalisées sur des véhicules électriques de particuliers. La perte de performance l'hiver est due à deux facteurs : le chauffage de la cabine et la perte de puissance de la batterie à cause des températures. Pour compenser le chauffage de la cabine, il est possible de faire un préchauffage lors de sa recharge. Actuellement, les technologies des batteries électriques des véhicules sont en nette évolution. Ainsi, il est possible d'envisager qu'un camion de 480 kWh aurait des pertes hivernales plus faibles. Ce qui se rapproche le plus de l'autonomie du camion sont les modèles de Tesla. D'après le retour d'expérience de conducteur, les modèles peuvent perdre au maximum 30 % de ses performances en froid extrême (-30 °C). (L'équipe RPM, 2019).

Avant de commencer l'implantation des véhicules de collecte électrique, il faut développer des outils afin de dimensionner les circuits en fonction de l'autonomie du véhicule. Comme les bus électriques permettent de régénérer jusqu'à 30 % de l'énergie via les arrêts, il serait envisageable de conserver une autonomie minimale d'au moins 30 % de la batterie lors du dimensionnement du circuit. (Kéolis, 2018). Dans notre cas, un circuit en été pourra faire au maximum 280 km, et en hiver 200 km. Il existe des astuces pour limiter les effets du froid. Par exemple, faire une recharge de la batterie juste avant le départ permet de bénéficier de la chaleur du système de recharge pendant les premières minutes d'opération. (Futura-sciences, 2020). Au niveau de l'habitacle, le chauffeur peut privilégier un chauffage direct par les sièges chauffants que le chauffage entier de la cabine. (Futura-sciences, 2020).

Lors de la conception et des tracés des circuits, le collecteur ou la municipalité doit prendre en compte la capacité de la benne, le taux de génération de déchet au km et ainsi le nombre d'aller/retour prévu

vers le centre de traitement. Les circuits devraient être tracés en commençant par les zones avec les plus gros tonnages pour limiter le nombre de km à parcourir à vide. Ensuite, pour les zones à plus faible densité et à faible tonnage, il faut privilégier l'optimisation des distances et de la consommation. Il est possible de prendre en compte les pentes sur les logiciels d'informations géographiques. Ainsi, il faudrait simuler chaque circuit tracé avec les données de consommation du constructeur et laisser une période d'essai au collecteur privé pour s'adapter.

Actuellement, l'utilisation de camion électrique pour la collecte n'est pas possible vu qu'il n'y pas de camions disponibles pour l'instant. Cependant, lorsque des camions seront disponibles, les collecteurs privés ainsi que les municipalités pourraient faire la demande de location à court terme d'un camion pour en faire l'essai sur circuit. Ces tests permettront de collecter des données sur la consommation du véhicule. Le logiciel de gestion de la flotte permettra de vérifier la faisabilité de l'exécution des circuits. Pour aller plus loin, il serait intéressant d'essayer plusieurs configurations de circuit afin de déterminer la configuration la plus optimale pour le camion électrique (en effet, comme le moteur électrique permet de régénérer de l'énergie). Si les circuits sont tracés de manière optimale, il serait envisageable que l'autonomie du véhicule soit améliorée. Des études universitaires traitent ce sujet de manière générale, mais il pourrait être intéressant de développer un outil de planification énergétique pour les municipalités et les collecteurs afin de faire un dimensionnement optimal des circuits de collecte. (Trigui, 2017, Baouche, 2015).

Finalement, sur le très long terme, si le camion électrique avait accès à un point de recharge rapide en milieu de la zone de collecte, cela permettrait de rallonger son autonomie pour finir l'exécution de son circuit. Il existe depuis les années 2015, des stations de recharge ultrarapide pour les bus électriques. À l'arrêt du dépôt, qui se situe généralement en fin de circuit, un pantographe vient s'appuyer automatiquement sur le support de recharge du véhicule, lui offrant une recharge rapide pendant sa pause d'une quinzaine de minutes. (STM, 2016, Novabus, 2017 et Green Car Congress, 2014). De manière plus réaliste, le stationnement de nuit des camions électriques devrait être proche du lieu de traitement des matières afin de minimiser les déplacements. En cas de panne, les chauffeurs pourraient s'échanger des camions et continuer leur circuit.

8.2. Des préalables techniques

Les contraintes techniques sont principalement liées aux changements d'habitudes et de comportement des collecteurs privés lors de l'utilisation d'un véhicule de collecte électrique. En effet, son utilisation demande plus de réflexion et de planification qu'un véhicule de collecte conventionnel roulant au diesel.

Pour faciliter la transition, il serait avantageux de travailler sur les changements liés au véhicule et d'en réduire les contraintes pour les employés.

Dans la grande majorité des contrats de collecte, les horaires d'opération sont de 7 h à 18 h, cela laisse amplement le temps de faire la recharge du camion la nuit. Cependant, la recharge d'un véhicule électrique doit se planifier. En cas d'oubli de recharge, la collecte du lendemain sera impactée : le camion LION se recharge en 8 heures, ce qui limite son utilisation lorsqu'il faut rattraper une anomalie de collecte non prévue. Pour atténuer ce problème, il est possible de prévoir un camion supplémentaire au garage disponible uniquement pour la résolution d'anomalie (panne sur circuit, rattrapage d'une collecte, etc.). Une autre solution est d'installer une recharge rapide au garage afin de bénéficier d'une autonomie supplémentaire en cas d'anomalie de collecte. En moins d'une heure, le camion pourrait bénéficier de la moitié de son autonomie lui permettant de résoudre l'anomalie.

Un camion électrique demande plus de gestion de la part du chef d'équipe de la collecte. Dans une collecte classique avec du diesel, les chauffeurs peuvent oublier de faire le plein après leur journée de travail, mais dans le cadre d'un camion tout électrique, l'oubli de la recharge entraîne un retard d'au minimum 4 heures dans les opérations. C'est pourquoi il faut penser à former les chauffeurs en amont de la mise en opération du camion électrique. Cette formation pourrait prendre la forme d'une formation à l'écoconduite, d'un test de conduite sur le camion électrique, sur la gestion de la charge ainsi que sur les consignes de sécurité supplémentaires qu'entraîne un camion tout électrique (présence de haut voltage). (ADEME, 2019 et ADEME, 2012).

Pour limiter les contraintes pour les chauffeurs qui opèrent la collecte et favoriser ainsi l'implantation de la technologie, il faut absolument que les opérations soient inchangées, voire améliorées. Les tests effectués par la MRC d'Arthabaska en sont de bons exemples. Les tests du camion électrique LION furent négatifs puisqu'en partie la benne de collecte n'avait pas le même fonctionnement que les bennes classiques. (F. Gauthier, conversation téléphonique, 18 février 2020). Afin de limiter ce problème, il faut permettre au collecteur de faire le choix du type de benne. Il faudrait pouvoir permettre au collecteur de choisir son modèle de benne pour limiter les changements de comportements de la part de ses employés. Ou alors, lui proposer une formation gratuite sur la benne afin de montrer à l'un des employés (par exemple, le chef d'équipe) la bonne utilisation de la benne. Il faut arriver à exposer les bienfaits du camion électrique.

Lors des tests de la MRC d'Arthabaska, une des problématiques était qu'en hiver, la matière organique colle au fond des bacs et le bras mécanique proposé par la benne électrique ne permettait pas de

décoller cette matière (F. Gauthier, conversation téléphonique, 18 février 2020). C'est un problème mineur, mais pour faciliter la transition, il faut supprimer tous les détails pouvant nuire à l'image du camion électrique. Ainsi, il faut être capable de proposer un camion électrique améliorant le bien-être et la qualité de travail du chauffeur. Le camion électrique a l'avantage d'être moins bruyant et de n'émettre aucun polluant direct pouvant nuire à la santé du chauffeur. Cependant, il faut pouvoir justifier cela auprès du collecteur et éliminer les détails mineurs pouvant détériorer les opérations. Si le camion électrique a une image positive auprès des employés, cela favorisera son utilisation. Dans un contexte de manque de main d'œuvre, il faut rendre l'électrification attrayante en réfléchissant aux améliorations possibles pour la qualité de travail des employés.

Au niveau de la recharge, il faut s'assurer que le garage du collecteur possède une puissance électrique suffisante pour effectuer la recharge de sa flotte. L'entreprise LION offre une expertise terrain pour ses clients afin de déterminer les installations nécessaires, et les potentielles modifications du circuit électrique. C'est un accompagnement personnalisé permettant de planifier l'arrivée des camions de collecte électrique au sein de la flotte du collecteur. (P. Laurin, courriel, 25 février 2020). Dans les grandes villes, il faudrait donner la possibilité au camion de se recharger sur les stations de recharge rapides de la ville, afin de limiter les stations de recharge du garage. Le Circuit électrique dispose de plus de 2 900 bornes au Québec, dont au moins 200 de recharge rapide. (Le Circuit électrique, 2019). Dans les tracés de circuits, les collecteurs pourraient identifier les stations de recharge rapide à proximité de leur circuit et lors des pauses se brancher sur une station afin d'améliorer l'autonomie du véhicule. Une recharge rapide de niveau 3 permet de gagner 10 km en 15 minutes. Cependant, une recharge de niveau 2 permet de gagner seulement 8 km en 1 heure ce qui n'est pas envisageable. (Charge Hub, 2020)

Finalement, il faut proposer davantage de formation pour les mécaniciens sur les véhicules électriques. Afin de limiter les difficultés de gestion de la maintenance des camions électriques, le collecteur pourrait proposer à son mécanicien une formation sur les véhicules électriques, notamment sur les camions électriques. Il pourrait planifier une visite avec le mécanicien et le fabricant de camions électrique afin de lui montrer les différentes pièces présentes, le fonctionnement des pièces, l'usure des pièces et la fréquence d'entretien de chacune des pièces. L'objectif est d'informer les mécaniciens sur les méthodes de maintenance à adopter pour le camion électrique et de l'intégrer totalement dans le projet. Une intégration de l'ensemble des parties prenantes permet d'avoir une plus grande chance de succès. (ADEME, 2012 et ADEME, 2019).

Pour améliorer la gestion des pannes et réduire les temps d'immobilisation des véhicules électriques, le collecteur doit identifier avec le constructeur du véhicule et son équipe de maintenance, les bris possibles en cours d'opération et identifier les actions à mettre en place en cas de bris. Il faut prévoir les risques possibles pour chaque pièce et prévoir un scénario en cas de panne sur circuit, au garage, etc. Ainsi, il pourrait être avantageux de garder des pièces en inventaire dans le garage (pour les pièces avec la plus grande probabilité de bris sur circuit). Par exemple, lors des tests de la MRC d'Arthabaska, le camion électrique a subi plusieurs bris, mettre en place une stratégie de gestion des pannes aurait pu être une solution afin de limiter ces bris.

Afin de développer une image plus verte et soucieuse de l'environnement, le constructeur de véhicule électrique devrait identifier pour chaque composant de son véhicule, le circuit de gestion en fin de vie. Par exemple, pour la batterie, il pourrait identifier les potentiels recycleurs du Québec (à venir) et définir avec eux des modalités de reprise/recyclage de la batterie. Ainsi, sur sa fiche technique, pour améliorer son image et favoriser la transition énergétique, il pourrait indiquer sa gestion en fin de vie de chaque équipement composant son véhicule.

8.3. Des préalables réglementaires

Certains détails réglementaires pourraient favoriser l'implantation d'une collecte électrique. Les préalables identifiés sont principalement liés à la rédaction des appels d'offres. Pour commencer, lors de la rédaction des appels d'offres, il pourrait être intéressant de rajouter des critères environnementaux permettant de faire une sélection des soumissionnaires sur d'autres paramètres que celui des frais d'exploitation. Par exemple, dans son appel d'offres la Ville de Pointe-Claire a établi des critères environnementaux favorisant les soumissionnaires utilisant des carburants verts. (Ville de Pointe-Claire, 2019). Cependant, cela n'est pas toujours réalisable. En effet, en appliquant des critères environnementaux dans une région où il existe un seul collecteur disposant d'une technologie verte, l'appel d'offres sera considéré comme ciblé et ainsi non légal. C'est le cas des municipalités en Estrie, le seul collecteur roulant au gaz naturel est Sanie-Estrie, faire un appel d'offres privilégiant l'utilisation de carburant vert serait ciblé, ce qui explique la difficulté à adopter des critères environnementaux. Pour limiter cela, il faudrait favoriser la démocratisation des technologies vertes auprès des collecteurs privés.

Il est également possible de privilégier les soumissionnaires possédant une politique environnementale ou une norme environnementale (comme la norme ISO 14001). Comme les certifications environnementales sont souvent très coûteuses, l'appel d'offres pourrait inclure des obligations afin que le soumissionnaire réponde aux grandes lignes des normes environnementales. Ainsi, la municipalité

pourrait exiger du soumissionnaire d'avoir un suivi régulier de la consommation de carburant de sa flotte et des actions qu'il met en place afin de réduire sa consommation (exemple : optimisation régulière de ses circuits, formation à l'écoconduite, politique d'arrêt du moteur en marche ralenti, etc.). La municipalité pourrait également exiger du soumissionnaire qu'il compense un pourcentage de ses émissions GES à travers une entreprise de compensation locale avec des projets de compensation au Québec.

Finalement, pour accélérer la transition énergétique, les municipalités pourraient établir des règlements sur les normes d'émissions des véhicules en ville. Par exemple, dans les grandes métropoles européennes, il existe des zones à faibles émissions : l'accès des véhicules les plus polluants est interdit. (Cerema, 2019). Cela permettrait de favoriser l'utilisation de carburant vert pour les camions de collecte en zone fortement urbanisée, et ainsi limiter les risques de smog et pour la santé humaine.

8.4. Des préalables politiques

Les détails des contraintes politiques (acceptabilité sociale, choix de la mairesse, volonté de développement, test d'une technologie nouvelle) qui favorisent l'implantation d'une collecte électrique sont présentés dans cette section.

Les impacts de la collecte sont très peu connus par le grand public. Quand le grand public voit un camion de collecte, il ne s'image pas que ce camion consomme entre 1/10 voire 1/4 d'un bidon de diésel de 1L pour venir prendre son bac. C'est pourquoi il est indispensable de rendre publique les données de consommation des camions électriques. La municipalité, la MRC, et le gouvernement doivent communiquer sur l'importance de mettre son bac à la rue uniquement lorsqu'il est plein afin de réduire le nombre d'arrêts/démarrages. C'est la phase des circuits qui consomme le plus. La médiatisation de ces données permettra de justifier l'importance d'améliorer l'efficacité des technologies de collecte, et favorisera la transition énergétique.

L'électrification de la collecte doit venir d'une décision politique (de la volonté des élus), d'une volonté de développement interne. En effet, le coût à l'achat d'un véhicule électrique de collecte est élevé, mais il se rentabilise au bout de 2 à 3 ans (dans le pire scénario). Le collecteur n'apportera pas le changement par lui-même puisque les frais d'exploitation sont chargés à la municipalité. Ainsi, pour éviter une augmentation des coûts de collecte et limiter les frais chargés aux citoyens, l'électrification de la collecte pourrait être une solution.

Dans le secteur de la collecte privée, le passage à l'électrique doit venir d'une volonté de la direction. C'est elle qui doit être la première actrice du changement. Elle pourrait mettre en place une politique environnementale, et développer une stratégie d'inclusion des parties intéressées afin de réduire les impacts de ses opérations : inciter les chauffeurs à adopter une conduite plus souple, favoriser les communications entre le constructeur, le service maintenance et les clients (municipalité/MRC, citoyens), etc.

Finalement, il faut que le gouvernement continue de développer son aide pour l'achat de véhicule électrique, ainsi que pour l'installation et l'achat de borne de recharge. Il faut qu'il favorise le développement des technologies vertes afin de stimuler les marchés et permettre à l'industrie québécoise de se développer. En subventionnant les nouvelles technologies vertes, le gouvernement investit dans l'expertise québécoise et les coûts des véhicules devraient diminuer favorisant son déploiement.

9. RECOMMANDATIONS

Comme il est présenté dans les chapitres précédents, l'électrification de la collecte a de nombreux avantages tant sur le plan économique qu'environnemental. Cependant, pour voir apparaître une collecte des matières résiduelles municipales entièrement électrique, il faut inciter les collecteurs privés ainsi que les municipalités à prendre le virage vert. Les recommandations formulées ci-dessous permettent de proposer des pistes d'actions pour le domaine municipal afin de renforcer l'utilisation de carburant alternatif dans le secteur de la collecte.

9.1. Ajouter des clauses environnementales dans les appels d'offres

Le secteur de la collecte autrefois opéré entièrement par les municipalités, a été transmis au privé afin de réduire les coûts. Cependant, pour la majorité des contrats c'est l'indice de prix qui fixe le prestataire. Certaines municipalités comme la Ville de Pointe-Claire innovent et ajoutent des critères environnementaux dans leurs appels d'offres afin de faire une sélection d'un prestataire plus proche de leurs convictions environnementales. Le modèle des appels d'offres pourrait être revu afin d'intégrer des critères environnementaux. Chaque collecteur pourrait être noté suivant plusieurs critères avec une pondération variable suivant les objectifs et les convictions des municipalités. Il serait possible de récompenser les bons gestes d'un collecteur privé en attribuant des points à l'utilisation de carburant alternatif (biodiésel, gaz naturel), à la certification de l'entreprise (exemple de la certification ISO 14001 ou prise en compte des directives de la norme), aux actions entreprises par la compagnie (plan de développement durable, suivi de la consommation, formation à l'écoconduite, compensation d'un pourcentage des GES émis, etc.) Le but est de stimuler le développement d'un comportement écoresponsable au sein des collecteurs privés. Par ailleurs pour des raisons juridiques, dans les zones géographiques où il n'existe qu'un seul collecteur pouvant offrir un service plus vert, il n'est pas possible d'inclure des clauses environnementales. Cela est vu comme des appels d'offres dirigés.

9.2. Rédiger, mettre en place et faire appliquer une réglementation municipale dans les grands centres urbains pour limiter les émissions de polluants nocifs à la santé humaine (NOx, COV, etc.)

Dans les dernières années, plusieurs grandes villes européennes ont subi des taux élevés de smog ce qui a eu des effets nocifs pour la population. Au Canada la pollution atmosphérique est la cause de plus de 4 400 décès prématurés, l'asthme est l'une des maladies respiratoires chroniques les plus courantes au Canada. (Lavigne, 2019). Pour limiter les smogs, les grands centres urbains mettent en place des programmes de limitation d'accès du centre à certains types de véhicules polluants. Cette

recommandation peut par exemple s'appliquer à la ville de Montréal. La ville dispose déjà d'un réseau de surveillance de la qualité de l'air. Elle pourrait renforcer ses mesures de lutte pour assurer la qualité de l'air extérieur sur son territoire en interdisant la circulation de camion lourd au diesel à l'intérieur de son centre-ville. Cela aurait pour effet de stimuler des services de collecte innovants et moins nocifs pour la santé humaine.

9.3. Collecter, documenter, partager et rendre public les données de consommation de la collecte des matières résiduelles.

Le secteur de la collecte des matières résiduelles est très peu connu du grand public. Les citoyens aperçoivent seulement le passage des camions de collecte, et pour la grande majorité d'entre eux leur seule interaction avec le service est la mise en bordure de rue de leur bac. Ils n'ont pas conscience de la consommation en carburant du service qui leur est proposé. C'est un service public, mais les données de consommation sont confidentielles et peu diffusées par les municipalités afin de réduire la compétition possible. Cependant, le citoyen devrait être en mesure de savoir ce que son service émet pour faire des choix censés. Cela permettrait de stimuler les bonnes pratiques au sein de la collecte : un service qui consomme moins et donc qui émet moins de GES aurait une meilleure image sur le territoire. Un collecteur pourrait gagner en notoriété auprès de ses clients (municipalités et MRC) et des usagers finaux (citoyens) en favorisant un comportement écoresponsable lors de son activité. Cette action pourrait prendre la forme d'une obligation du collecteur privé à produire et transmettre un rapport annuel de consommation et d'émissions de GES à la municipalité/MRC.

9.4. Communiquer sur l'importance de sortir ses bacs uniquement lorsqu'ils sont pleins

Plusieurs projets pilotes de collecte intelligente au Québec donnent la consigne aux citoyens de mettre leur bac en bordure de rue uniquement lorsqu'ils sont pleins. Cela a pour effet de réduire le temps de travail du chauffeur/du camion, de réduire la consommation (moins d'arrêt/démarrage), et permet de faire une meilleure optimisation des circuits de collecte. Indépendamment d'un projet de collecte intelligente, toutes les municipalités du Québec devraient donner cette consigne aux citoyens. C'est une action concrète facilement réalisable et qui pourrait avoir un impact non négligeable sur la collecte.

9.5. Analyser les options de mutualisation du service de collecte entre municipalité et MRC adjacentes

Certaines municipalités et MRC du Québec possèdent de très grandes superficies. Il faut parfois parcourir beaucoup de distance afin d'assurer le service de collecte sur l'ensemble du territoire. Des municipalités et MRC adjacentes pourraient se concerter autour d'une table ronde afin d'identifier des

zones de collecte à uniformiser entre les territoires afin d'optimiser les distances parcourues. Certaines zones de municipalités et MRC adjacentes pourraient être échangées afin d'obtenir des circuits plus efficaces et plus respectueux de l'environnement.

CONCLUSION

Face aux différents accords internationaux sur le climat, le Québec a toujours été très optimiste. En 2020, le Québec fait le point et la cible de réduction des GES est loin d'être atteinte. Le secteur du transport est pointé du doigt vu qu'il repose majoritairement sur des produits pétroliers. Pour lutter contre les changements climatiques et réduire la dépendance au carburant fossile dans le secteur du transport, le gouvernement du Québec met en place des programmes de subvention de technologies propres. Les entreprises, les organismes publics ainsi que les municipalités peuvent profiter du programme Écocamionnage afin de réduire l'empreinte environnementale du transport routier des marchandises.

En 2019, de nombreuses municipalités du Québec ont rédigé un plan d'action pour la réduction de GES. Cependant, peu d'entre elles ont identifié des actions au niveau des émissions de GES de la collecte des matières résiduelles. Cela s'explique peut-être par le manque d'information à ce sujet et le peu de compagnies sur le marché qui utilisent des technologies plus propres. Ce travail permet de combler ce manque en donnant au monde municipal une étude sur les avantages économiques et environnementaux de l'utilisation de carburant vert dans le domaine de la collecte des matières résiduelles. Les gestionnaires de municipalités y trouveront une documentation adaptée à leur contexte avec des données de consommation pour chaque type de technologie. Ils pourront ainsi faire des choix éclairés dans leur décision.

Les résultats de cette étude démontrent que l'électrification de la collecte des matières résiduelles possède de nombreux avantages tant sur le plan économique que sur la réduction des GES. Le bilan carbone des camions de collecte montre l'importance de la phase d'opération dans les émissions carbone. Un camion consomme beaucoup de carburant, l'électrification permet d'optimiser cette consommation de carburant en s'appuyant sur une énergie avec une faible empreinte carbone et à un coût largement inférieur au carburant conventionnel. Cependant comme la technologie n'est pas encore éprouvée sur le territoire municipal, sa démocratisation est encore très difficile. Les subventions mises en place par le gouvernement sont la pierre angulaire de l'électrification des transports, mais il faut que le virage vert se démocratise à l'intérieur des entreprises de collecte ainsi que des municipalités. Les gestionnaires du domaine municipal doivent intégrer progressivement des mesures afin d'inciter le secteur privé d'utiliser des camions plus propres.

Pour affiner cette étude, il faudra aller sur le terrain en analysant les données de consommation des camions de collecte électrique et compiler les difficultés rencontrées pour l'opérationnalisation d'une

collecte électrique. De plus, il serait intéressant de pousser l'analyse de l'empreinte carbone du camion électrique en s'intéressant davantage à la production des camions sur le territoire Québécois et sur le potentiel de la filière de recyclage des batteries Li-ion. Afin de penser à un virage vert, il faut aussi tenir compte des circuits des matières utilisés pour la fabrication, la maintenance et la fin de vie des technologies de collecte et pas uniquement de la phase d'opération.

RÉFÉRENCES

- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME). (s. d.). Les matériels de transport et de collecte. Repéré à http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/docs/Temis/0023/Temis-0023511/10466_2.pdf
- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME). (2012). Collecte des déchets en BOM hybrides GNV/électriques. Repéré à <https://prod-optigede.ademe-dri.fr/fiche/collecte-des-dechets-en-bom-hybrides-gnv-electriques>
- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME). (2018). *Collecte en porte-à-porte*. Repéré à <https://www.ademe.fr/expertises/dechets/quoi-parle-t/prevention-gestion-dechets/dossier/collecte/collecte-porte-a-porte>
- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME). (2019). *Collecte des déchets en BOM hybrides diesel/électriques*. Repéré à <https://optigede.ademe.fr/fiche/collecte-des-dechets-en-bom-hybrides-dieseleelectriques>
- Agglomération de Montréal. (2013). *Plan de réduction des émissions de gaz à effet de serre corporative 2013-2020*. Repéré à https://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/ENVIRO_FR/MEDIA/DOCUMENTS/PLAN_CORPORATIF_2013-2020_VF.PDF
- Agglomération de Québec. (2014). *Plan de réduction des gaz à effet de serre 2011-2020*. Repéré à https://www.ville.quebec.qc.ca/apropos/planification-orientations/environnement/changements-climatiques/docs/plan_reduction_gaz_effet_de_serre_2011_2020.pdf
- Air Resources Board. (2015). *Technology assessment : medium and heavy Duty Battery Electric Trucks and Buses*. Repéré à https://ww3.arb.ca.gov/msprog/tech/techreport/bev_tech_report.pdf
- Akendi. (2018). *Ecologisation des parcs gouvernementaux. Guide des pratiques d'excellence*. Repéré à https://www.rncan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/energy/pdf/buildings/NRCan_GreeningGovFleets_f.pdf
- Allard, R., Laplante, L., Deger L. (2015). *Le transport des hydrocarbures par modes terrestres au Québec*. Repéré à <https://www.inspq.qc.ca/bise/le-transport-des-hydrocarbures-par-modes-terrestres-au-quebec>
- Al-Maalouf, G. (2012). *Elaboration d'une structure de collecte des matières résiduelles selon la théorie constructale*. Mémoire de maîtrise. Ecole de Technologie Supérieure, Montréal, Québec. Repéré à http://espace.etsmtl.ca/1075/1/AL-MAALOUF_George.pdf
- Argonne National Laboratory. (2014). *Well-to-Wheels GHG Emissions of Natural Gas Use in Transportation : CNGVs, LNGVs, EVs, and FCVs*. Repéré à <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&cad=rja&uact=8&ved>

=2ahUKEwjqvc2emt_nAhVBYjUKHb07AxUQFjAEegQIAhAB&url=https%3A%2F%2Fgreet.es.anl.gov%2Ffiles%2FEERE-LCA-NG&usg=AOvVaw3aBA3Xrrz_O4NhNXbFZkqy

Arsenault, D. (2008). *Optimisation d'un système hybride innovateur pour camion à ordures*. Mémoire de maîtrise. Ecole de technologie supérieure, Montréal, Québec. Repéré à http://espace.etsmtl.ca/1077/1/ARSENAULT_David.pdf

Association canadienne des automobilistes du Québec (CAA Québec). (2020a). *Borne de recharge*. Repéré à <https://www.caaquebec.com/fr/sur-la-route/interets-publics/mobilite-durable/bornes-de-recharge/>

Association canadienne des automobilistes du Québec (CAA Québec). (2020b). *Conduire un véhicule électrique l'hiver*. Repéré à <https://www.caaquebec.com/fr/auto/conseils/capsules-conseils/conseil/show/sujet/conduire-un-vehicule-electrique-lhiver/>

Association Canadienne des Carburants Renouvelables (ACCR). (2010). *Au-delà du pétrole. Assurer notre avenir énergétique. Un bulletin sur l'industrie canadienne des carburants renouvelables*. Site de l'ACCR, [En ligne]. Repéré à <http://ricanada.org/wp-content/uploads/2010/11/crfareportcardfrenchfinal.pdf>

Association des Véhicules Électriques du Québec (AVEQ). (2018). *Statistiques SAAQ-AVEQ sur l'électromobilité au Québec en date du 31 mars 2018*. Repéré à <https://www.aveq.ca/actualiteacutes/statistiques-saaq-aveq-sur-lelectromobilite-au-quebec-en-date-du-31-mars-2018-infographie>

Association des Véhicules Électriques du Québec (AVEQ). (2019). *Statistiques SAAQ-AVEQ sur l'électromobilité au Québec en date du 30 septembre 2019*. Repéré à <https://www.aveq.ca/actualiteacutes/statistiques-saaq-aveq-sur-lelectromobilite-au-quebec-en-date-du-30-septembre-2019-infographie>

Association québécoise des transports. (2016). *En route vers une collecte des matières résiduelles plus efficace... et moins polluante*. Repéré à <https://aqtr.com/association/actualites/route-collecte-matieres-residuelles-plus-efficace-moins-polluante>

Bakker, D. (2010). *Battery Electric Vehicles: Performance, CO2 emissions, lifecycle costs and advanced battery technology development*. Copernicus Institute at University of Utrecht. Repéré à http://www.emic-bg.org/files/files/Battery_Electric_Vehicles.pdf

Ballerini, D. (2006). *Les biocarburants: États des lieux, perspectives et enjeux du développement*. Paris. Éditions Technip, 2006.

Baouche, F. (2015). *Outils pour l'optimisation de la consommation des véhicules électriques*. Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat [ENTPE]. Thèse pour l'obtention du grade de Docteur de l'ENTPE. Repéré à <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01778368v2/document>

BBC News. (2020, 22 janvier). *Cambridgeshire electric bin lorry better for climate change*. BBC News. Repéré à <https://www.bbc.com/news/uk-england-cambridgeshire-51197080>

- Béguin, M. (2013). *L'histoire des ordures : de la préhistoire à la fin du dix-neuvième siècle*. Vertigo. La revue électronique en sciences de l'environnement, 13 (3). Repéré à <https://www.erudit.org/en/journals/vertigo/2013-v13-n3-vertigo01538/1026864ar.pdf>
- Bellavance, J-D. (2019, 29 septembre). Véhicules électriques : Trudeau promet 5 000 nouvelles bornes de recharge. *La Presse*. Repéré à <https://www.lapresse.ca/elections-federale/201909/28/01-5243319-vehicules-electriques-trudeau-promet-5-000-nouvelles-bornes-de-recharge.php>
- Bérubé, A. (2018). *Mettre un prix sur la pollution carbone à travers le Canada – Cours 101 d'un système à deux, trois ou quatre vitesses*. Équiterre. Repéré à <https://Équiterre.org/choix-de-societe/blog/mettre-un-prix-sur-la-pollution-carbone-a-travers-le-canada-%E2%80%93-cours-101-dun-sy>
- Bio Intelligence Service. (2012). *Transport et logistique des déchets. Rapport final*. AJI-Europe, BP2R. ADEME. 281 pages. Repéré à <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/7695-transport-des-dechets-etude.pdf>
- Boiral, O. (2006). *Écologie industrielle et valorisation des déchets*. Repéré à <https://www4.fsa.ulaval.ca/wp-content/uploads/2015/05/cologie-industrielle-et-valorisation-des-d%C3%A9chets.pdf>
- Boivin Evolution. (2020). *Introduction à la première benne de collecte avec bras automatisée 100% électrique*. Repéré à https://28d16714-b3dd-403e-a844-10d42b38b19e.filesusr.com/ugd/6b1a10_931687aa7d92491eab29fe7b7bd39687.pdf
- Bornes électriques Québec. (2019). *Combien coûtent l'achat et l'installation d'une borne de recharge*. Repéré à <https://borneselectriquesquebec.com/blogue/combien-coutent-lachat-et-linstallation-dune-borne-de-recharge/>
- Breezcar. (2018). *Voiture électrique : combien d'énergie perdue pour faire le plein? Publié le 11 octobre 2018. Fabrice SPATH*. Repéré à <https://www.breezcar.com/actualites/article/deperdition-energie-recharge-batterie-voiture-electrique-1018>
- Buchert, M., Jenseit, W., Merz, C. & Schüler, D. (2011). *Ökobilanz zum „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“ (LithoRec, Freiburg: Ökoinstitut eV*. Repéré à <https://www.oeko.de/oekodoc/1500/2011-068-de.pdf>
- Bureau du directeur parlementaire du budget. (2016). *Emissions de gaz à effet de serre au Canada : progrès, perspectives et réductions*. Repéré à https://www.pbo-dpb.gc.ca/web/default/files/Documents/Reports/2016/ClimateChange/PBO_Climate_Change_FR.pdf
- Bureau du directeur parlementaire du budget. (2019). *Analyse financière et distributive du système fédéral de tarification du carbone*. Repéré à https://www.pbo-dpb.gc.ca/web/default/files/Documents/Reports/2019/Federal%20Carbon/Federal_carbon_pricing_FR.pdf

- Bureau du vérificateur général du Canada. (2017). *Rapport 1 — Progrès vers la réduction des gaz à effet de serre — Environnement et Changement climatique Canada*. Repéré à https://www.oag-bvg.gc.ca/internet/Francais/parl_cesd_201710_01_f_42489.html
- Burnham, A., Laughlin, M.U.S. (2014). *Case Study – Compressed Natural Gas Refuse Fleets*. Repéré à http://www.afdc.energy.gov/uploads/publication/casestudy_cng_refuse_feb2014.pdf
- BYD Motors. (2015). *Zero-Emission Refuse Trucks for Los Angeles*. Repéré à <https://ww3.arb.ca.gov/gmp/sfti/sfpp/sfpp-018.pdf>
- C40 Cities. (2011). *Waste to Energy Cuts 200,000 tCO₂ Annually in Gothenburg*. Repéré à https://www.c40.org/case_studies/waste-to-energy-cuts-200000-tco2-annually-in-gothenburg
- Castonguay, S., Dietrich, J., Hamblin, A.P., Hannigan, P., Giles, P., Lavoie, D. et Pinet, N. (2009). *Petroleum resource assessment, Paleozoic successions of the St. Lawrence Platform and Appalachians of eastern Canada - Open File 6174*. Calgary, Dartmouth et Québec, Commission Géologique du Canada, Ressources naturelles Canada, 275 p.
- Centre de gestion de l'équipement roulant. (2017a). *Electrification des transports. Une expertise en matière de véhicules électriques à votre service*. Repéré à <http://www.cger.transports.gouv.qc.ca/virage-ecologique/electrification-des-transports/electrifications-des-transports.aspx>
- Centre de gestion de l'équipement roulant. (2017b). *Questionnaire pour l'aide à la sélection d'un véhicule léger pour les villes et les municipalités*. Repéré à http://www.cger.transports.gouv.qc.ca/CMSLibraries/Documents/VE/formulaire_selection_vehicule.xlsx
- Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG). (2007). *Développement et application d'un outil d'évaluation des scénarios de gestion des matières résiduelles*. Repéré à http://www.ciraig.org/pdf/developpement_application_outil_evaluation_1.PDF
- Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG). (2014). *Comparaison des filières de production d'électricité et des bouquets d'énergie électrique*. Rapport technique. Novembre 2014. Préparé pour Hydro-Québec. Repéré à <https://www.hydroquebec.com/data/developpement-durable/pdf/comparaison-filieres-et-bouquets.pdf>
- Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG). (2016). *Analyse du cycle de vie comparative des impacts environnementaux potentiels du véhicule électrique et du véhicule conventionnel dans un contexte d'utilisation québécois*. Rapport technique. Avril 2016. Préparé pour Hydro-Québec. Repéré à <https://www.hydroquebec.com/data/developpement-durable/pdf/analyse-comparaison-vehicule-electrique-vehicule-conventionnel.pdf>

- Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG). (2017). *Métaux et économie circulaire au Québec*. Repéré à <https://mern.gouv.qc.ca/publications/mines/freins-leviers-eddc.pdf>
- Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG). (2018). *Empreinte carbone et analyse du cycle de vie d'un terminal de liquéfaction au Saguenay*. Repéré à [https://energiesaguenay.com/media/cms_page_media/71/CR_Comit%C3%A9%20consultatif%20GNLQ_13%20f%C3%A9vrier%202018%20\(avec%20annexes\).pdf](https://energiesaguenay.com/media/cms_page_media/71/CR_Comit%C3%A9%20consultatif%20GNLQ_13%20f%C3%A9vrier%202018%20(avec%20annexes).pdf)
- Cerema. (2019). *Zones à Faible Emission (ZFE) : de quoi parle-t-on exactement?*. Repéré à <https://www.cerema.fr/fr/actualites/zones-faible-emission-zfe-quoi-parle-t-exactement>
- Chamard, J.L. et Méthot, J. (2016). *Réseau Environnement, 50 ans au service de la gestion des matières résiduelles*. Repéré à <https://www.reseau-environnement.com/wp-content/uploads/2016/04/Dossier-MR.pdf>
- Charge Hub. (2020). *Guide 2020 sur comment recharger une voiture électrique à l'aide des bornes de recharge*. Repéré à <https://chargehub.com/fr/guide-de-recharge-de-voiture-electrique.html>
- Chassin, Y. et Tremblay, G. (2014). *Annexe technique à la Note économique « Doit-on subventionner l'achat de voitures électriques? »*. Repéré à <https://www.iedm.org/files/annexe-technique1114.pdf>
- Circular. (2019, 31 mai). *Leading the charge*. Circular. Repéré à <https://www.circularonline.co.uk/features/leading-the-charge/>
- Clean Technica. (2014). *EV Charging Station Infrastructure Costs*. Josh Agenbroad and Ben Holland, may 2014. Repéré à <https://cleantechnica.com/2014/05/03/ev-charging-station-infrastructure-costs/>
- Coderre-LaPalme, G. (2014). *L'implication du syndicat dans la gestion de la prestation des services municipaux : une comparaison Québec-Ecosse*. Mémoire de maîtrise. Université de Montréal. Montréal, Québec. Repéré à https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/bitstream/handle/1866/11073/Coderre-LaPalme_Genevieve_2014_memoire.pdf?sequence=4&isAllowed=y
- Comité de l'évaluation environnementale stratégique sur le gaz de schiste. (2014). *Rapport synthèse. Evaluation environnementale stratégique sur le gaz de schiste*. Repéré à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/evaluations/Gaz-de-schiste/rapport-synthese.pdf>
- Compagnie des chemins de fer nationaux du Canada (CN). (2020). *Calculateur de gaz carbonique*. Repéré à <https://www.cn.ca/fr/engagement-responsable/environnement/emissions/calculateur-de-gaz-carbonique/>
- Conseil des entreprises en technologies environnementales du Québec (CETEQ). (2016). *Recommandations sur le projet de loi 106 concernant la mise en œuvre de la politique énergétique 2030 et modifiant diverses dispositions législatives*. Repéré à

- <http://www.ceteq.quebec/wp-content/uploads/2013/11/Recommandations-projet-de-Loi-106-FINAL.pdf>
- Cornelissen, K. (2010). *La biométhanisation à Montréal*. Conférence à l'UQAM. Repéré à <https://cremtl.org/sites/default/files/upload/documents/publications/biomethanisation.pdf>
- Corrales, M. (1996). Residential and industrial (solid) waste disposal support package, 32 p.
- Dana TM4. (2020). *Systèmes de motorisation électrique*. Repéré à <https://www.danatm4.com/fr/produits/>
- Dando, T. (2019, 4 septembre). Sheffield trials waste-powered electric bin. *Resource*. Repéré à <https://resource.co/article/sheffield-trials-waste-powered-electric-bin-lorries>
- Danna, N. (2011). *Hybrid Garbage Trucks Saving Miami-Dade Big Money*. Repéré à <https://www.govtech.com/transportation/Hybrid-Garbage-Miami-Dade-040511.html>
- Darley, J. (2004). High noon for natural gas, the new energy crisis. White River Junction, Chelsea Green Publishing Company. 266 p
- De Sousa, M. (2019, 21 juin). Renault Trucks livre un premier camion électrique à la Métropole de Lyon. *France Routes*. Repéré à <https://www.franceroutes.fr/actualites/renault-trucks-livre-un-premier-camion-electrique-a-la-metropole-de-lyon/>
- Derakhshan, R. (2019). *Energy Consumption and GHG Emissions Evaluation of Conventional and Battery-Electric Refuse Collection Trucks*. Master of Applied Science in the Department of Mechanical Engineering. University of Victoria, Colombie-Britannique, Canada. Repéré à https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=26&ved=2ahUKEwjFI5XY96nnAhXnguAKHbg-AcA4FBawMAV6BAgDEAE&url=https%3A%2F%2Fdspace.library.uvic.ca%2Fbitstream%2Fhandle%2F1828%2F11352%2FDerakhshan_Rojin_MASc_2019.pdf%3Fsequence%3D1%26isAllowed%3Dy&usq=AOvVaw2QW9GF6G6K3p72YezMa6R3
- Derichebourg Environnement. (2018). *Derichebourg Environnement lance en France le premier camion équipé de la technologie Active Stop-StartMC sur le territoire de la ville de Puteaux*. Repéré à <https://www.derichebourg.com/dam?media-id=5b91585e5804e90019e565e2>
- Di Maria, F., & Micale, C. (2013). *Impact of source segregation intensity of solid waste on fuel consumption and collection costs*. *Waste Management*, 33(11), 2170–2176. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.06.023>
- Dimitrova, A. (2019, 7 juin). Rotterdam introduces electric garbage trucks. *The Mayor*. Repéré à <https://www.themayor.eu/en/rotterdam-introduces-electric-garbage-trucks>
- Duhamel, J. (2010). *L'exploitation gazière au Québec dans un contexte de développement durable*. Essai de maîtrise. Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec. Repéré à https://www.usherbrooke.ca/environnement/fileadmin/sites/environnement/documents/Essais2010/Duhamel_J_07-10-2010_.pdf

- Dunsky. (2019). *Trajectoires de réduction d'émissions de GES du Québec – Horizons 2030 et 2050*. Repéré à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/changementsclimatiques/trajectoires-emissions-ges.pdf>
- Durabac. (2020). *La benne de collecte la plus profitable au monde*. Repéré à https://durabac.ca/inpak/Resources/documents/INPAK_depliant_fr.pdf
- EBI. (2019a). *Le moteur au gaz naturel peut-il résoudre le problème des changements climatiques?* Site web. Repéré à <https://ebigaznaturel.com/moteur-gaz-naturel-solution-changements-climatiques/>
- EBI. (2019b). *Le prix du gaz naturel comprimé est-il son principal avantage face aux autres carburants?* Site web. Repéré à <https://ebigaznaturel.com/bas-prix-gaz-naturel-comprime-seul-avantage/>
- EBI. (2020). *Gamme de camions à vocation au GNC*. Site web. Repéré à <https://ebigaznaturel.com/vehicules/camions-vocationnels/>
- Eltis. (2014). *World's 1st hybrid electric refuse collection truck in Göteborg/Sweden*. Repéré à <https://www.eltis.org/discover/case-studies/worlds-1st-hybrid-electric-refuse-collection-truck-goteborgsweden>
- Énergir. (2014). *Première à Québec : Gaudreau Environnement choisit le gaz naturel comme carburant*. Repéré à <https://www.Énergir.com/fr/a-propos/medias/nouvelles/premiere-a-quebec-gaudreau-environnement-choisit-le-gaz-naturel-comme-carburant/>
- Énergir. (2016). *Des camions ordures moins émissifs*. Repéré à <https://www.Énergir.com/blogue/energie/des-camions-a-ordures-moins-polluants/>
- Énergir. (2019a). *Changer de carburant pour réduire les gaz à effets de serre*. Repéré à <https://www.Énergir.com/fr/transport-demystification/>
- Énergir. (2019b). *La filière de production de gaz naturel renouvelable au Québec. Impacts économiques à l'horizon 2030 et contribution à l'économie circulaire*. Repéré à <https://www.Énergir.com/~media/Files/Corporatif/Publications/Rapport%20Final%20GNR.pdf?la=fr>
- Énergir. (2020). *Distribution de gaz naturel*. Repéré à <https://www.Énergir.com/fr/a-propos/nos-energies/gaz-naturel/gaz-naturel/>
- Enerkem. (2013). *Convertir les déchets en biocarburants et produits chimiques verts pour un monde plus propre*. Repéré à http://www.apcas.qc.ca/wp-content/uploads/2013/10/14-MH-Labrie_ENERKEM_APCAS_Mai2013.pdf
- Ennassiri, H. (2018). *Analyse magnéto-vibroacoustique des machines synchrones discoïdes à commutation de flux dédiées aux véhicules électriques hybrides*. Repéré à https://www.researchgate.net/profile/Hamza_Ennassiri/publication/331950661_Analyse_magneto-

vibroacoustique_des_machines_synchrones_discoides_a_commutation_de_flux_dediees_aux_v
ehiculex_electriques_hybrides/links/5dea26a7299bf10bc343e521/Analyse-magneto-
vibroacoustique-des-machines-synchrones-discoides-a-commutation-de-flux-dediees-aux-
vehiculex-electriques-hybrides.pdf?origin=publication_detail

Entreprise Québec. (2019). *Biométhanisation*. Site web. Repéré à
<https://www2.gouv.qc.ca/entreprises/portail/quebec/infosite?lang=fr&m=dossiers&x=2689212771&sm=2689212771>

Environnement Canada. (2014). *Projet de règlement visant à limiter les émissions de gaz à effet de serre provenant des nouveaux véhicules lourds routiers et leurs moteurs*. *Gazette du Canada*. Vol. 148, N°40, octobre 2014. Repéré à <http://gazette.gc.ca/rp-pr/p1/2014/2014-10-04/html/notice-avis-fra.html>

Environnement Canada. (2017). *Règlement modifiant le Règlement sur les émissions de gaz à effet de serre des véhicules lourds et de leurs moteurs et d'autres règlements pris en vertu de la Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999)*. *Gazette du Canada*. Vol. 151, N°9, mars 2017. Repéré à <http://gazette.gc.ca/rp-pr/p1/2017/2017-03-04/html/reg1-fra.html>

Environnement et Changement climatique Canada. (2019). *Rapport d'inventaire national 1990-2017 : sources et puits de gaz à effet de serre au Canada*. Repéré à
<https://unfccc.int/documents/198577>

Équiterre. (2008). *L'arrondissement de Ville-Marie en route vers un développement durable*. Volet 1. Matières résiduelles et déneigement. Repéré à
http://Équiterre.org/sites/fichiers/RAPPORT_ÉQUITERRE_VOLET_1_FINAL-1.pdf

Équiterre. (2009). *Vers des carburants moins polluants. Proposition d'encadrement d'une norme québécoise sur la teneur en carbone des carburants*. Repéré à
<https://Équiterre.org/sites/fichiers/NormesTeneurCarboneCarburants-2009.pdf>

Exiobase. (2015). *Exiobase 2 : Environmentally Extended Supply and Use / Input Output Database*. Repéré à : <http://www.exiobase.eu/index.php/data-download/exiobase2-year-2007-full-data-set>

Farzaneh, M. Zietsman, J. Lee, D.W. (2009). *Evaluation of In-Use Emissions from Refuse Trucks*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2123(-1), 38-45. Repéré à <https://stars.library.ucf.edu/etd/1147/>

Fleet equipment. (2020). *Mack Trucks demonstrates LR Electric Model for DSNY*. Repéré à
<https://www.fleetequipmentmag.com/mack-trucks-lr-electric-model/>

Fondation David Suzuki (2011). *Le gaz naturel est-il une bonne solution pour contrer le changement climatique au Canada ?*. Repéré à <https://www.pembina.org/reports/dsf-pembina-natgas-report-fr-final.pdf>

- Fondation Tuck. (2019). *Retour d'expériences sur les énergies nouvelles pour bennes à ordures ménagères*. Repéré à http://www.fondation-tuck.fr/upload/docs/application/pdf/2019-05/prsentation_h_grange.pdf
- Fonds Ecoleader. (2020). *Augmentation de l'efficacité énergétique des camions bennes de Derichebourg*. Repéré à https://www.fondsecoleader.ca/entreprise_leader/derichebourg-canada/
- Fontaras et al. (2012). *Assessment of on-road emissions of four Euro V diesel and CNG waste collection trucks for supporting air-quality improvement initiatives in the city of Milan*. Repéré à <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0048969712003993?token=7CD096427742F922EB6FBED1D08AB6C2B7BF1835ADE04E7FB6D448D69C01536CC87FFFF66282BB5208457231509EB77A>
- Fuel Cells and Hydrogen. (2017). *Development of Business Cases for Fuel Cells and Hydrogen applications for regions and cities*. Repéré à https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCH%20Docs/171121_FCH2JU_Application-Package_WG2_Garbage%20trucks%20%28ID%202910566%29%20%28ID%202911652%29.pdf
- FuelCellsWorks. (2019). *HECTOR Project Launches to demonstrate the Benefits of Hydrogen Fuel Cell technology to decarbonize Garbage Truck Fleets*. Repéré à <https://fuelcellsworks.com/news/hector-project-launches-to-demonstrate-the-benefits-of-hydrogen-fuel-cell-technology-to-decarbonise-garbage-truck-fleets/>
- Futura-sciences. (2020). *Voiture électrique : quelle autonomie quand il fait froid?* Repéré à <https://www.futura-sciences.com/tech/questions-reponses/voiture-electrique-voiture-electrique-autonomie-il-fait-froid-10799/>
- Gagné, S. (2006). *Biodiésel : un carburant qui tarde à s'implanter au Québec*. Repéré à <https://www.sciencepresse.qc.ca/actualite/2006/07/04/biodiesel-carburant-tarde-simplanter-quebec>
- Gagnon, C. (2012). *Gaudreau Environnement présente une nouvelle technologie pour la collecte de matières résiduelles*. Repéré à <https://www.infodimanche.com/actualites/actualite/84991/gaudreau-environnement-presente-une-nouvelle-technologie-pour-la-collecte-de-matieres-residuelles>
- Gallo, J., Tomic, J. (2013). *Battery electric parcel delivery truck testing and demonstration*. Repéré à http://www.calstart.org/Libraries/CalHEAT_2013_Documents_Presentations/Battery_Electric_Parcel_Delivery_Truck_Testing_and_Demonstration.sflb.ashx
- Gaz Métro. (2016). *Gaz naturel et transport. Une solution gagnante pour améliorer l'empreinte environnementale des municipalités*. Repéré à https://www.fqm.ca/wp-content/uploads/2016/09/HH-Politique_energetique_2016-2030.pdf
- Gesterra. (2020). *Projet pilote de collecte intelligente des matières résiduelles des citoyens de la MRC d'Arthabaska*. Repéré à <https://www.gesterra.ca/collecteintelligente-citoyens>

- Global Green. (2015). *Case Studies Electric Refuse Trucks*. Repéré à <https://static1.squarespace.com/static/5548ed90e4b0b0a763d0e704/t/5a06268b8165f5c9f8d2abfe/1510352529108/Re-Inventing+the+Garbage+Truck+12.3.15+DRAFT+For+Comments.pdf>
- Gouvernement du Canada. (2017). *Transport routier*. Repéré à <https://www.tc.gc.ca/fra/politique/anre-menu-3021.htm>
- Gouvernement du Québec. (2011). *Politique Québécoise de gestion des matières résiduelles. Plan d'action 2011-2015*. Repéré à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/matieres/pgmr/plan-action.pdf>
- Gouvernement du Québec. (2012). *Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques. Phase 1. Le Québec en action vert 2020*. Repéré à http://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/plan_action/pacc2020.pdf
- Gouvernement du Québec. (2015). Propulser le Québec par l'électricité. Plan d'action en électrification des transports 2015-2020. Repéré à https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/ministere/role_ministere/electrification/Documents/PAET.pdf
- Gouvernement du Québec. (2016). *La Politique énergétique 2030 du Québec. L'énergie des Québécois, source de croissance*. Repéré à <https://mern.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2016/04/Politique-energetique-2030.pdf>
- Gouvernement du Québec. (2018). Programme d'aide Ecocamionnage. Repéré à <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/aide-finan/entreprises-camionnage/aide-ecocamionnage/Pages/aide-ecocamionnage.aspx>
- Gouvernement du Québec, transition énergétique. (2019). Programme Transportez vert. Repéré à <https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/transport/programmes/transportez-vert>
- Gouvernement du Québec. (2020). Votre avenir, votre budget. Repéré à http://www.budget.finances.gouv.qc.ca/budget/2020-2021/fr/documents/Budget2021_Discours.pdf
- Green Car Congress. (2014). *Opbrid Trukbaa ultra-high-power automatic charging station for heavy-duty trucks debuts at IAA 2014*. Repéré à <https://www.greencarcongress.com/2014/09/20140910-opbrid.html>
- Groupe Labrie Enviroquip. (2019). *Camion de collecte au GNL*. Site web. Repéré à <http://www.labriegrup.com/index.php?lang=fr>
- Grumel, N. (2018, 27 novembre). Pollutec 2018 : les constructeurs font la part belle au gaz et à l'électrique. *France Routes*. Repéré à <https://www.franceroutes.fr/evenements/pollutec-2018-les-constructeurs-font-la-part-belle-au-gaz-et-a-lelectrique/>

- Hydraulics & Pneumatics. (2015). *Ohio Town Welcomes First Hydraulic Hybrid Garbage Trucks*. Repéré à <https://www.hydraulicspneumatics.com/applications/waste-management/article/21884521/ohio-town-welcomes-first-hydraulic-hybrid-garbage-trucks>
- Hydro-Québec. (2015). *L'électricité du Québec, l'énergie propre par excellence. Hydro-Québec Affaires corporatives et secrétariat général*. Repéré à <https://www.hydroquebec.com/data/developpement-durable/pdf/15094F.pdf>
- Hydro-Québec. (2018a). *AddEnergie et ABB fourniront les bornes rapides du Circuit électrique. Communiqué de presse, publié le 31 juillet 2018*. Repéré à <https://nouvelles.hydroquebec.com/fr/communiques-de-presse/hq/1396/addenergie-et-abb-fourniront-les-bornes-rapides-du-circuit-electrique/>
- Hydro-Québec. (2018b). *CGI collabore avec Hydro-Québec pour lancer MILE, une solution qui permet de s'attaquer aux causes des pannes d'électricités avant qu'elles ne se produisent. Communiqué de presse, publié le 18 octobre 2018*. Repéré à <https://nouvelles.hydroquebec.com/fr/communiques-de-presse/hq/1431/cgi-collabore-avec-hydro-quebec-pour-lancer-mile-une-solution-qui-permet-de-sattaquer-aux-causes-des-pannes-deelectricite-avant-quelles-ne-se-produisent/>
- Hydro-Québec. (2018c). *Notre réseau de transport d'électricité*. Repéré à <http://www.hydroquebec.com/transenergie/fr/reseau-bref.html>
- Hydro-Québec. (2019a). *Calculez les économies que vous pourriez faire avec une voiture électrique*. Repéré à <http://www.hydroquebec.com/electrification-transport/voitures-electriques/calculez-vos-economies.html>
- Hydro-Québec. (2019b). *L'énergie et le savoir-faire d'Hydro-Québec révolutionnent le secteur des transports*. Repéré à <http://www.hydroquebec.com/electrification-transport/>
- Hydro-Québec. (2019c). *Moteurs pour véhicules électriques*. Repéré à <http://www.hydroquebec.com/electrification-transport/moteurs-electriques.html>
- Hydro-Québec. (2019d). *Plan d'approvisionnement 2020-2029. Hydro-Québec Distribution*. Repéré à http://publicsde.regie-energie.qc.ca/projets/529/DocPrj/R-4110-2019-B-0005-Demande-Piece-2019_11_01.pdf
- Hydro-Québec. (2020). *Hydro-Québec Production. Profil de la division*. Repéré à <http://www.hydroquebec.com/production/profil.html>
- Industrie & Technologies. (2014). *Le retour de la benne à ordures électrique*. Jean-François Preveraud, publié le 7 janvier 2014. Repéré à <https://www.industrie-techno.com/article/le-retour-de-la-benne-a-ordures-electrique.27232>
- Institut de la statistique du Québec. (2019). *Le Québec chiffre en main*. Repéré à https://www.stat.gouv.qc.ca/quebec-chiffre-main/pdf/qcm2019_fr.pdf

- Institut de Recherche en Économie contemporaine. (2020). *L'hydrogène, un vecteur énergétique pour la transition*. Repéré à <https://irec.quebec/ressources/publications/Hydrogene-Vecteur-energetique-pour-la-transition-IREC2020.pdf>
- Institut de recherche en santé et en sécurité du travail (IRSST). (2017). Emissions de moteur diesel. Fiche d'information sur le fardeau des cancers professionnels. Repéré à <https://www.irsst.qc.ca/Portals/0/upload/misc/2017/forum-cancerogene/FICHE-DIÉSEL.pdf>
- Institut national de la recherche scientifique (INRS). (2015). Géologie et potentiel en hydrocarbures des bassins sédimentaires du sud du Québec. Rapport de recherche R1552. Repéré à <http://espace.inrs.ca/6525/1/R1552.pdf>
- Institut National de Santé Publique du Québec. (2004). *Vivre dans une collectivité rurale plutôt qu'en ville fait-il vraiment une différence en matière de santé et de bien-être?*. Repéré à <https://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/269-RuraliteVilleDifference.pdf>
- Institut national de santé publique. (2018). *Évaluation des risques pour la santé humaine des gaz d'échappement des moteurs à essence*. Repéré à <https://www.inspq.qc.ca/bise/evaluation-des-risques-pour-la-sante-humaine-des-gaz-d-echappement-des-moteurs-essence>
- International Energy Agency (IEA) (2009). Natural gas - Market review 2009. Paris, IEA Publications, 194 p.
- Kachanova. (2014). *Les écocentres québécois : portrait et recommandations pour le réseau de deuxième génération. Essai de maîtrise*. Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec. Repéré à https://www.usherbrooke.ca/environnement/fileadmin/sites/environnement/documents/Essais_2015/Kachanova_V__2014-12-08_.pdf
- Kawamoto, R. et al. (2019). *Estimation of CO2 Emissions of Internal Combustion Engine Vehicle and Battery Electric Vehicle Using LCA*. Repéré à <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=6&ved=2ahUKEwj9ku-S6LjoAhWHbs0KHR12CPkQFjAFegQIARAB&url=https%3A%2F%2Fwww.mdpi.com%2F2071-1050%2F11%2F9%2F2690%2Fpdf&usq=AOvVaw0lOY1x8pc5hc1UMEMq6OWI>
- KD Communications (2011). *What are the Effects of Biofuels and Bioproducts on the Environment, Crop and Food Prices and World Hunger?* Repéré à <https://gfo.ca/wp-content/uploads/2018/01/Biofuel%20Report%20-%20Full%204.26.11a.pdf>
- Kéolis. (2018). *Pour une mobilité propre et durable : bus électriques*. Repéré à https://www.keolis.com/sites/default/files/atoms/files/brochure_bus_electrique_keolis.pdf
- Kostenko, D. T., & dos Santos, E. M. (2014). *Impacto Ambiental na Substituição de Combustível Automotivo Convencional por GNV—Caso de Caminhões de Coleta de Lixo*. Repéré à <http://www.arsesp.sp.gov.br/RegistroTecnicoProjetos/gnsps/Projeto%2023%20GNSPS%20Resumo%20T%C3%87cnico%20do%20Projeto.pdf>

- L'équipe RPM. (2019). *L'impact des grands froids sur l'autonomie des piles des voitures électriques*. Repéré à <https://rpmweb.ca/fr/actualites/environnement/l-impact-des-grands-froids-sur-l-autonomie-des-piles-des-voitures-electriques>
- La compagnie Lion électrique. (2020). *Fiche technique du camion Lion 8 dédié à la collecte des ordures*. Repéré à https://thelionelectric.com/documents/fr/lion8_application2.pdf
- La Nouvelle union. (2014). *Gaudreau Environnement opte pour le gaz naturel*. Repéré à <https://www.lanouvelle.net/2014/11/19/gaudreau-environnement-opte-pour-le-gaz-naturel/>
- La Presse. (2017, 19 juin). Expert helping-hand en vedette en Estrie. *La Presse*. Repéré à http://www.labriegroup.com/index.php?option=com_content&view=article&id=488:cite-limoilou-fin-de-la-collecte-des-ordures-de-soir-des-le-13-juin-3&catid=56&Itemid=815&lang=fr
- Lagneau, J. (2018). *Étude multi-échelles des coûts de gestion de la matière résiduelle organique au Québec*. Mémoire de maîtrise. Ecole Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec. Repéré à https://publications.polymtl.ca/3673/1/2018_JeremyLagneau.pdf
- Langlois, P. (2015). *Les camions au gaz naturel émettent plus de GES que les camions diesel sur le cycle de vie*. Roulezélectrique. Electrification des transports. Repéré à <http://roulezelectrique.com/les-camions-au-gaz-naturel-emettent-plus-de-ges-que-les-camions-diesel-sur-le-cycle-de-vie/>
- Lavigne. (2019). *Les effets de la pollution de l'air sur la santé au Canada : quoi de neuf?* Repéré à https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/jasp/archives/2019/jasp2019_pollution_air_eric_lavigne.pdf
- Lawson, A. et Cooke, N. (2013). *Evaluation de la performance des camions au GNL en hiver*. Repéré à <http://cngva.org/wp-content/uploads/2017/12/Cold-Weather-Performance-Study-November-2013.pdf>
- Le Circuit électrique. (2019). *Le circuit électrique, c'est... Statistiques au 31 décembre 2019*. Repéré à <https://lecircuitelectrique.com/>
- Le système électronique d'appel d'offres du gouvernement du Québec [SEAO]. (2019). Site web. *Recherche des appels d'offres publics de collecte des matières résiduelles*. Repéré à https://www.seao.ca/Recherche/rech_simpleresultat.aspx?SearchParameter=collecte%20des%20d%C3%A9chets&callingPage=2&Results=1#p=3
- Leduc, G. (2016, 27 juin). Groupe labrie enviroquip: être troisième ne suffit pas. *Le Soleil*. Gilbert Leduc, 27 juin 2016. Repéré à http://www.labriegroup.com/index.php?option=com_content&view=article&id=460:groupe-labrie-enviroquip-etre-troisieme-ne-suffit-pas&catid=56&lang=fr&Itemid=815
- Léveillé, J-T. (2019, 10 décembre). Une entreprise de Montréal ambitionne de révolutionner le recyclage des batteries lithium-ion, utilisées notamment dans les véhicules électriques. *La Presse*. Repéré à <https://www.lapresse.ca/actualites/environnement/201912/10/01-5253151-une-usine-de-recyclage-de-batteries-lithium-ion-verra-le-jour-a-montreal.php>

- Life Cycle Assessment Society of Japan. (2015). *LCA Database 2015FY*, 4th ed. Tokyo, Japan.
- López J., Gómez A., Aparicio F., Sánchez J. (2009). *Comparison of GHG emissions from diésel, biodiésel and natural gas refuse trucks of the City of Madrid*. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261908001967>
- Magtec. (2017). *The Case For Repowering Refuse Collection Vehicles from Diésel to Electric*. Repéré à <https://static1.squarespace.com/static/5ae87244b105982d79d73cf5/t/5be2dbac0e2e72e2e81ba15c/1541594076246/ERCV+Final+Report.pdf>
- Maimoun, M. (2015). *Life-cycle Greenhouse Gas Emissions and Water Footprint of Residential Waste Collection and Management Systems*. Electronic Theses and Dissertations. 1147. Repéré à <https://stars.library.ucf.edu/etd/1147/>
- Maimoun, M., Madani, K., Reinhart, D. (2016). *Multi-level multi-criteria analysis of alternative fuels for waste collection vehicles in the United States*. *Science of the Total Environment*. Volume 550, pages 349-361. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969715313115>
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN). (2019c). *Prix des biocarburants*. Repéré à <https://mern.gouv.qc.ca/energie/statistiques-energetiques/prix-biocarburants/>
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN). (2019a). *Analyse d'impact réglementaire. Projet de règlement concernant le volume minimal de carburant renouvelable dans l'essence et le carburant diésel*. Octobre 2019. Repéré à https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/energie-ressources-naturelles/publications-adm/lois-reglements/allegement/AIR_Projet__reglement_volume_carburant_MERN.pdf?1570737693
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN). (2019b). *Biocarburants – Prépublication du projet de règlement concernant le volume minimal de carburant renouvelable dans l'essence et le carburant diésel*. Communiqué de presse du 1er octobre 2019. Repéré à <https://mern.gouv.qc.ca/carburant-renouvelable-projet-reglement-volume-minimal-2019-10-01/>
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN). (2020a). *Bioénergie*. Repéré à <https://mern.gouv.qc.ca/energie/innovation/bioenergie/>
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN). (2020b). *Gaz naturel*. Repéré à <https://mern.gouv.qc.ca/energie/hydrocarbures/gaz-naturel/>
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (MERN). (2020c). *Les hydrocarbures*. Repéré à <https://mern.gouv.qc.ca/energie/hydrocarbures/>
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). (2018a). *Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2016 et leur évolution depuis 1990*. Québec. Repéré à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/2016/Inventaire1990-2016.pdf>

- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). (2018b). Norme véhicules zéro émission (VZE). Repéré à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/changementsclimatiques/vze/index.htm>
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). (2018c). *Profil des émissions de gaz à effet de serre des organismes municipaux du Québec. Moyennes basées sur les résultats des municipalités participant au programme Climat municipalités (2009-2013)*. 19 pages. Repéré à www.environnement.gouv.qc.ca/programmes/climat-municipalites2/profil-emissions.pdf
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). (2018d). *Programme Climat municipalités-Phase 2 – Programme mis en œuvre dans le cadre du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques, Cadre normatif – 2018*. 20 pages. Repéré à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/programmes/climat-municipalites2/cadre-normatif.pdf>
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). (2019). Guide de quantification des émissions de gaz à effet de serre. Repéré à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/guide-quantification/guide-quantification-ges.pdf>
- Ministère de la Transition écologique et solidaire, France. (n.d.). *Les matériels de transport et de collecte. Base documentaire du ministère du Développement durable*. France. Repéré à http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/docs/Temis/0023/Temis-0023511/10466_2.pdf
- Ministère des transports. (2019). *Liste des technologies admissibles au financement – Programme d'écocamionnage*. Repéré à <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/aide-finan/entreprises-camionnage/aide-ecocamionnage/Documents/liste-technologies-admissibles-francais.pdf>
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatique (MDDELCC). (2017). *Analyse d'impact réglementaire du règlement d'application de la Loi visant l'augmentation du nombre de véhicules automobiles zéro émission au Québec afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre et autres polluants. 2017*, 57 p. Repéré à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/changementsclimatiques/vze/AIR-reglement201712.pdf>
- Moultak, M., Lutsey, N., Hall, D. (2017). *Transitioning to zero-emission heavy-duty freight vehicles*. Repéré à https://theicct.org/sites/default/files/publications/Zero-emission-freight-trucks_ICCT-white-paper_26092017_vF.pdf
- MRC de Joliette. (2019). *Plan de gestion des matières résiduelles 2016-2020*. Repéré à <https://mrcjoliette.qc.ca/wp-content/uploads/2019/01/MRC-de-Joliette-PGMR-2016-2020-web.pdf>
- MRC Robert-Cliche. (2020). *La collecte intelligente*. Repéré à <https://www.beaucerc.com/fr/collecte-intelligente>

- Nobert, Y., Messier, N., & Leduc, A. (2005). *Le transbordement des matières résiduelles sur l'île de Montréal (Solid waste transfer on Montreal island)*. Montreal, Quebec, Canada.
- Normand, F. (2017, 9 septembre). Le projet de bioraffinerie d'Enerkem se concrétise. *Les Affaires*. Repéré à <https://www.pressreader.com/canada/les-affaires/20170909/282943860423263>
- Novabus. (2017). *OPPCharge – Charge rapide de véhicules électriques*. Repéré à <http://novabus.com/fr/oppcharge-charge-rapide-de-vehicules-electriques/>
- O'Connor, D. (2011). *Biodiésel GHG Emissions, past, present, and future*. Repéré à <http://task39.sites.olt.ubc.ca/files/2013/05/IEA-Bieonergy-Task-39-Biodiésel-GHG-Emissions-Past-Present-and-Future.pdf>
- O'Meara, D. (2016). *Les avantages du gaz renouvelable pour le Canada*. Association canadienne du gaz. Repéré à <http://www.energymag.ca/fr/markets/the-opportunity-for-renewable-natural-gas-in-canada/>
- Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). 2008. *La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2008 – Les biocarburants : perspectives, risques et opportunités*.
- Organisation internationale de normalisation (ISO), 2006. *ISO 14064-1:2006. Gaz à effet de serre — Partie 1: Spécifications et lignes directrices, au niveau des organismes, pour la quantification et la déclaration des émissions et des suppressions des gaz à effet de serre*. Repéré à <https://www.iso.org/fr/standard/38381.html>
- Organisation internationale de normalisation [ISO], 2020. *ISO 14000 Management environnemental*. Repéré à <https://www.iso.org/fr/iso-14001-environmental-management.html>
- Palluet, E. et Pineau, P-O. (2012). *Les biocarburants : matières premières, transformation et produits*. Note thématique. Groupe de recherche interdisciplinaire sur le développement durable. HEC Montréal. Repéré à https://www.hec.ca/developpement_durable/recherche/Gridd_Notes_Thematiques_1-Biocarburants.pdf
- Paquet, J. (2010). *Les biocarburants : enjeux et perspectives*. Québec, Laboratoire d'étude sur les politiques publiques et la mondialisation, ENAP, 16 p. Rapport évolutif. Analyse des impacts de la mondialisation sur l'environnement au Québec. Rapport 8. Repéré à http://www.leppm.enap.ca/leppm/docs/Rapports_environnement/Rapport_8_environnement_mars2010.pdf
- Phare Climat. (2008). *Utiliser la technologie pour optimiser l'efficacité énergétique de camions industriels*. Repéré à <https://www.phareclimat.com/151-des-camions-qui-roulent-plus-vert>
- Propulsion Québec. (2019a). *Developing a promising sector for Quebec'economy. Lithium-ion Battery Sector*. Repéré à <https://propulsionquebec.com/wp-content/uploads/2019/09/RAPPORT-BATTERIES-LITHIUM-ION-EN-2.pdf?download=1>

- Propulsion Québec. (2019b). *Étude comparative de la réglementation et des politiques publiques sur les transports électriques et intelligents*. Repéré à https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=15&ved=2ahUKEwjaz4GqWMLIAhXIVt8KHTqABZQ4ChAWMAR6BAGFEAI&url=http%3A%2F%2Fccmm.ca%2Fetude_transports_electriques&usg=AOvVaw3YeXquUBg9vBzH6E5jAPCK
- ProSim. (2018). *Exemple d'application de ProSimPlus : Synthèse du méthanol*. Repéré à http://www.prosim.net/bibliotheque/File/Exemples-Applications-PSP/FR/PSPS_E27_FR-Synthese-methanol.pdf
- PureSphera. (2016). *Service complet de récupération de réfrigérateurs et autres appareils frigorifiques ménagers*. Repéré à <https://puresphera.com/services/service-aux-municipalites/>
- Québec Science. (2019). *Rouler grâce à nos déchets est maintenant possible*. Repéré à <https://www.quebecscience.qc.ca/technologie/rouler-grace-a-nos-dechets-est-maintenant-possible/>
- Radio-Canada. (2019). *Hydro-Québec lance Hilo, une filiale de gestion intelligente de l'électricité*. Radio-Canada, publié le 16 octobre 2019. Repéré à <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1347528/hydro-quebec-hilo-gestion-intelligente-electricite>
- Recyc-Québec. (2006). *Guide sur la collecte sélective des matières recyclables*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/guide-coll-select-mat-recyc.pdf>
- Recyc-Québec. (2016). *Meilleures pratiques d'appels d'offres pour la collecte et le traitement des résidus verts et alimentaires*. Repéré à https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/Rapport%20DAO_ACC_VF%20%281%29.pdf
- Recyc-Québec. (2018). *Système de consignment. Fiche informative*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/Fiche-info-consigne.pdf>
- Recyc-Québec. (2019a). *Réduction à la source*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/Fiche-info-reduction.pdf>
- Recyc-Québec. (2019b). *Responsabilité élargie des producteurs. Fiche informative*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/fiche-info-rep.pdf>
- Régie de l'énergie. (2020). *Bulletin d'information sur les prix des produits pétroliers au Québec*. Repéré à http://www.regie-energie.qc.ca/energie/releve_hebdo_essence/bulletin.pdf
- Régie de l'Énergie. (n.d.). *Coefficients d'émissions*. Repéré à http://www.regie-energie.qc.ca/audiences/3471-01/Memoire/Mem3471_FCSQ-AGPI-2doc8.pdf
- Règlement sur les carburants renouvelables, DORS/2010-189
- Règlement sur les émissions de gaz à effet de serre des automobiles à passagers et des camions légers, DORS/2010-201

- Règlement sur les émissions de gaz à effet de serre des véhicules lourds et de leurs moteurs, DORS/2013-24
- Réseau des ingénieurs du Québec. (2017). *Transformer le bois en carburant du futur*. Repéré à https://oraprdnt.uqtr.quebec.ca/pls/public/docs/GSC1243/F_657590974_transformer_.pdf
- Réseau Environnement. (2019). *Nos vieux frigos seront pris en charge par les vendeurs d'électroménagers : le Québec fait un pas de plus pour lutter contre les changements climatiques!* Repéré à https://www.reseau-environnement.com/rep_frigos_gouv_quebec/
- Ressources naturelles Canada. (2013). *Industrie canadienne des biocarburants. Rentabilité annuelle et examen du marché en 2011*. Repéré à https://www.rncan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/energy/pdf/2011%20Annual%20Report%20French_FRE.pdf
- Rose, L., Hussain, M., Ahmed, S., Malek, S., Costanzo, R., Kjeang, E. (2013). *A comparative life cycle assessment of diesel and compressed natural gas powered refuse collection vehicles in a Canadian city*. Energy Policy, Volume 52, 2013, Pages 453-461. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421512008464?via%3Dihub>
- Rothsay. (2019). *Production de biodiésel*. Repéré à <https://www.rothsay.ca/fr/durabilite/production-de-biodiesel>
- Roulez Electrique. (2018). *Loi favorisant l'établissement d'un service public de recharge rapide pour véhicules électriques*. Projet de loi #184. Repéré à https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=23&ved=2ahUKEwi5sLbWwclIAhUpWN8KHUw9Du44FBAWMAJ6BAgEEAI&url=http%3A%2F%2Fwww.assnat.qc.ca%2FMedia%2FProcess.aspx%3FMediaId%3DANQ.Vigie.Bll.DocumentGenerique_139307%26process%3DDefault%26token%3DZyMoxNwUn8ikQ%2BTRKYwPCjWrKwg%2BvIv9rjij7p3xLGTZDmLVSmJLoqe%2FvG7%2FYWzz&usg=AOvVaw3qv9zLyCzy2zF3ZEPs8BkX
- Roulons Electrique. (2020). *Choisir un véhicule rechargeable qui répond à vos besoins. Edition 2020*. Repéré à <https://www.roulonselectrique.ca/documents/2/Brochure-Electro-FR-low.pdf>
- Sani-Estrie. (2018). *Roulez au gaz naturel grâce à la station de remplissage de Sani-Estrie Inc.* Repéré à <https://sani-estrie.com/station-gaz-naturel-de-sani-estrie/>
- Sani-Estrie. (2019). *4 raisons d'utiliser la station de gaz naturel de Sani-Estrie inc. pour ravitailler votre flotte*. Repéré à <https://sani-estrie.com/4-raisons-utiliser-station-gaz-naturel-sani-estrie-pour-ravitailler-votre-flotte/>
- Santé Canada. (2017). *Evaluation des risques pour la santé humaine des gaz d'échappement des moteurs à essence - Sommaire*. Repéré à <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/publications/vie-saine/valuation-risques-pour-sante-humaine-gaz-echappement-moteurs-essence-sommaire.html>

- SEA Electric. (2019). *City of Belmont and SUEZ welcome first Electric Vehicle recycling truck to the neighbourhood*. Publié le 2 septembre 2019. Repéré à <https://www.sea-electric.com/city-of-belmont-and-suez-welcome-first-electric-vehicle-recycling-truck-to-the-neighbourhood/>
- Séguin, F. (2017). *Capacité de production hydroélectrique et stockage d'énergie au Canada*. Chaire de gestion du secteur de l'énergie, HEC Montréal. Repéré à https://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2017/02/Rapport-d%C3%A9tude_2017-1_SEGUIN.pdf
- Sirois, F. Bourdel, B. et Malhamé, R. (2017). *Projet RENE-034: Gestion des capacités de stockage d'énergie dispersées dans un réseau électrique pour l'amortissement des effets de variabilité des sources d'énergie renouvelable*. Rapport public. Polytechnique Montréal, Montréal (QC), Canada. Repéré à http://www.professeurs.polymtl.ca/f.sirois/smartDESC_rapport_public.pdf
- Société de transport de Montréal (STM). (2002). *Bulletin Biobus. Numéro 2 – Octobre 2002*. Repéré à http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/per/1136786/2002/02_Bulletin_2.pdf
- Société de transport de Montréal (STM). (2003). *Rapport de fin de projet BIOBUS*. Repéré à http://www.sinenomine.ca/Download/Biobus_fra.pdf
- Société de transport de Montréal (STM). (2016). *Cité mobilité. Un premier pantographe est installé*. Repéré à <http://www.stm.info/sites/default/files/pdf/fr/stminfo/161104-stminfo.pdf>
- Statistique Canada. (2019). *Indices des prix de la consommation décembre 2019 : taux d'inflation dans les provinces et dans certaines villes*. Repéré à <http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/economie/comparaisons-economiques/interprovinciales/chap11.pdf>
- Tanguy, A. (2017). *Approche territoriale de la valorisation des déchets : élaboration d'un modèle pour la conception de filières adaptées au territoire*. Thèse de doctorat. Ecole de Technologie Supérieure, Montréal, Québec. Repéré à http://espace.etsmtl.ca/1976/1/TANGUY_Audrey.pdf
- The International Council on Clean Transportation. (2018). *Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions*. à https://theicct.org/sites/default/files/publications/EV-life-cycle-GHG_ICCT-Briefing_09022018_vF.pdf
- Théroux, P. (2016, 12 octobre). Une benne en aluminium plus écologique. *La presse +*. Repéré à <https://aluquebec.com/fr/publications/manchettes/benne-en-aluminium-plus-ecologique>
- Torontoist. (2016). *What Toronto Can Learn from Chicago's Electric Garbage Truck*. Repéré à <https://torontoist.com/2016/08/what-toronto-can-learn-from-chicago/>
- Transition Énergétique Québec. (2019a). *Facteurs d'émission et de conversion*. Repéré à <https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/fileadmin/medias/pdf/FacteursEmission.pdf>
- Transition Énergétique Québec. (2019b). *Liste des technologies admissibles : programme Transportez vert*. Repéré à

- https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/fileadmin/medias/pdf/transport/TV_Liste_des_technologies_admissibles_191021.pdf
- Transition Énergétique Québec. (2020). *Remboursement pour une borne au travail*. Repéré à <https://vehiculeselectriques.gouv.qc.ca/rabais/travail/programme-remboursement-borne-recharge-travail.asp>
- Trigui , O. (2017). *Méthode de gestion énergétique d ' un véhicule électrique basée sur l' estimation en ligne de la masse et de coefficient de résistance au roulement. Mémoire dans le cadre de la maîtrise en génie mécanique. Université du Québec à Trois-Rivières. Trois-Rivières, Québec*. Repéré à <http://depot-e.uqtr.ca/8089/1/031627607.pdf>
- TTI Environnement. (2015). *TTI Environnement fait le saut et devient la première PME québécoise à se doter d'un camion de collecte au gaz naturel comprimé !* Repéré à <http://www.ttienvironnement.com/fr/Communiqu%C3%A9.pdf>
- U.S Department of Energy. (2014). *Case Study – Compressed Natural Gas Refuse fleets*. Repéré à https://afdc.energy.gov/files/u/publication/casestudy_cng_refuse_feb2014.pdf
- UBC Sustainability Scholar. (2018). *Life Cycle Analysis of Electric Vehicles*. Repéré à https://sustain.ubc.ca/sites/default/files/2018-63%20Lifecycle%20Analysis%20of%20Electric%20Vehicles_Kukreja.pdf
- Université de Montréal. (2019). *Vers le recyclage des batteries de véhicules électriques*. Repéré à <https://nouvelles.umontreal.ca/article/2019/07/10/vers-le-recyclage-des-batteries-de-vehicules-electriques/>
- Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR). (2019). *Optimiser la demande résidentielle en électricité. Service des communications. UQTR, Trois-Rivières, Québec, publié le 27 mai 2019*. Repéré à <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1347528/hydro-quebec-hilo-gestion-intelligente-electricite>
- US Hybrid Corporation. (2015). *Demonstration and Deployment of a Fuel Cell-Electric Refuse Truck for Waste Transportation*. Repéré à https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress15/x_5_goodarzi_2015.pdf
- Ville de Beaconsfield. (2019). *La collecte intelligente*. Repéré à <https://www.beaconsfield.ca/fr/tarification-incitative-1>
- Ville de Drummondville. (2020). *Information sur le projet pilote de collecte intelligente*. Repéré à <https://www.drummondville.ca/collecte-intelligente/information-projet-pilote/>
- Ville de Joliette. (2014). *Inventaire 2012 des émissions de gaz à effet de serre*. Repéré à https://www.joliette.ca/storage/app/media/Inventaire_2012.pdf
- Ville de Joliette. (2018). *Plan d'action visant la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) 2015-2020*. Repéré à <https://www.joliette.ca/storage/app/media/Plan%20de%20r%C3%A9duction%20GES%20-%20Bilan%202018.pdf>

- Ville de Laval. (2004). *Laval dresse un inventaire de ses émissions de gaz à effet de serre*. Repéré à http://www.mamunicipaliteefficace.ca/DATA/ETUDEDECAS/66_fr~v~Laval_dresse_un_inventaire_de_ses_emissions_de_gaz_a_effet_de_serre.pdf
- Ville de Lévis. (2014). *Plan de réduction des gaz à effet de serre de la Ville de Lévis 2013-2021*. Repéré à https://www.ville.levis.qc.ca/fileadmin/Documents_PDF/Plan_reduction_GES_web.pdf
- Ville de Longueuil. (2013a). *Inventaire des émissions des gaz à effet de serre de la Ville de Longueuil*. Repéré à https://www.longueuil.quebec/files/longueuil/images/PDF/BILAN_AECOM_Longueuil_Inventaire_FINAL_2013.pdf
- Ville de Longueuil. (2013b). Site web. *Lutte aux changements climatiques*. Repéré à <https://www.longueuil.quebec/fr/lutte-aux-changements-climatiques>
- Ville de Longueuil. (2013c). *Plan stratégique de développement durable*. Repéré à https://www.longueuil.quebec/files/longueuil/images/pdf/Plan_strategique_developpement_durable.pdf
- Ville de Montréal. (2005). *Le transbordement des matières résiduelles sur l'île de Montréal*. Repéré à https://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/ENVIRO_FR/MEDIA/DOCUMENTS/15.transbordement_mat_residuelles_1.PDF
- Ville de Montréal. (2007). *Étude sur les modes, outils et choix technologiques pour les collectes sélectives des matières résiduelles applicables au territoire de l'Agglomération de Montréal*. Repéré à https://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/ENVIRO_FR/MEDIA/DOCUMENTS/4.etude_modes_choix_technologiques_1.PDF
- Ville de Montréal. (2018a). *Bilan 2018 des matières résiduelles de l'agglomération de Montréal*. Repéré à http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/ENVIRO_FR/MEDIA/DOCUMENTS/BILAN_2018_MATIERES_RESIDUELLES.PDF
- Ville de Montréal. (2018b). *Suivi du Plan de réduction des émissions de gaz à effet de serre de la collectivité montréalaise 2013-2020, une production du Service de l'environnement, 64 pages*. Repéré à http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/enviro_fr/media/documents/suiviplancollectivite2013-2020.pdf
- Ville de Montréal. (2019). *Révision du Plan directeur de gestion des matières résiduelles 2020-2025*. Repéré à https://ameqenligne.com/news_pdf/pdf_docs__20191017021033_26_9.pdf
- Ville de Pointe-Claire. (2017). *Horaire pour les collectes de matières résiduelles*. Repéré à <https://www.pointe-claire.ca/fr/actualites/a-compter-3-avril-nouvel-horaire-collectes-de-matieres-residuelles/>
- Ville de Pointe-Claire. (2019). *Appel d'offres – Services collecte et transport matières résiduelles année ferme 2020-2023*. Repéré à

- <https://seao.ca/OpportunityPublication/ConsulterAvis/Recherche?callingPage=2&ItemId=6a2f7236-51c7-4ff0-b857-3546733608d1&COpp=Search&&searchId=db6e935b-871e-4816-874e-ab560141542a>
- Ville de Québec. (2020). *Ecocentre. Site web*. Repéré à <https://www.ville.quebec.qc.ca/citoyens/environnement/matieres-residuelles/ecocentres/index.aspx>
- Ville de Sherbrooke. (2012). *Plan d'action visant la réduction des émissions de GES 2010-2015*. Repéré à https://www.ville.sherbrooke.qc.ca/fileadmin/fichiers/environnementsherbrooke.ca/Neutralisation/2012-11-22_Rapport_final_revise_plan_d_action_de_reduction_GES_-_Ville_de_Sherbrooke.pdf
- Ville de Sherbrooke. (2016). *Plan de gestion des matières résiduelles 2016-2020*. Repéré à https://www.ville.sherbrooke.qc.ca/fileadmin/fichiers/environnementsherbrooke.ca/Plandegestiondesmatieresresiduelles/PGMR_2016-2020_SEPT-2016_compVF_ENVIGUEUR_ss_annexes.pdf
- Ville de Sherbrooke. (2018). *Inventaire des émissions GES de la ville de Sherbrooke. Mise à jour 2016*. Repéré à https://www.ville.sherbrooke.qc.ca/fileadmin/fichiers/environnementsherbrooke.ca/Neutralisation/2019-0172_Annexe_1_Inventaire_GES_Sherbrooke_2016.pdf
- Ville de Sherbrooke. (2020). *Opération de déneigement*. Repéré à <https://www.ville.sherbrooke.qc.ca/sous-site/entretien-hivernal/operations-de-deneigement/>
- Volvo Group Trucks Technology. (2013). *Hybrid & Electric Medium Duty Trucks*. Repéré à http://academie-technologies-prod.s3.amazonaws.com/2014/04/01/12/47/24/674/08_Thomas_JUSTIN_Hybrid_trucks_a_solution_for_cities.pdf
- Waste Management. (2014). *Profil d'un parc de véhicules au gaz naturel – camions de déchets au GNC*. Repéré à <http://cngva.org/wp-content/uploads/2018/01/Waste-Management-Fleet-Profile-FR-1.pdf>
- Whitmore, J. et Pineau, P.O. (2018). *Etat de l'énergie au Québec 2019*. Chaire de gestion du secteur de l'énergie, HEC Montréal. Préparé pour Transition énergétique Québec, Montréal. Repéré à http://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2018/12/EEQ2019_WEB.pdf
- Xiong S., Ji J., Ma X. (2019). *Comparative Life Cycle Energy and GHG Emission Analysis for BEVs and PhEVs : A Case Study in China*. Repéré à <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&ved=2ahUKEwj9ku-S6LjoAhWHbs0KHR12CPkQFjAGegQIBBAB&url=https%3A%2F%2Fwww.mdpi.com%2F1996-1073%2F12%2F5%2F834%2Fpdf&usq=AOvVaw1hY5T8sBO4pOKf8z5N94AM>
- Zhao, Y. et Tatari, O. (2017). *Carbon and energy footprints of refuse collection trucks: A hybrid life cycle evaluation*. Sustainable Production and Consumption, Volume 12, 2017. Pages 180-192. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235255091730026X>

ANNEXE 1. IMPACTS DE DIFFÉRENTES FILIÈRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

Tableau A1. Données relatives aux impacts de différentes filières de production d'électricité (extrait de (Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services [CIRAIG], 2014).

	Hydro	Biogaz	Gaz naturel	Mazout
Émission de GES (gCO ₂ eq/kWh)	6 et 17	247	620	878
Destruction de la couche d'ozone (µg éq.CFC-11/kWh)	0,23	8	61	107
Acidification (g éq.SO ₂ /kWh)	0,013	1,7	1,0	6,3
Eutrophisation (mg éq.PO ₄ /kWh)	3,7	301	102	412
Toxicité humaine (g éq. 1,4-DB /kWh)	2	29	5	65
Oxydation photochimique (mg éq. C ₂ H ₄ /kWh)	0,8	363	103	296
Épuisement des ressources (mg éq.Sb/kWh)	0,03	0,001	9	11

ANNEXE 2. DONNÉE DE CONSOMMATION DE DIFFÉRENTES FLOTTES DE CAMION DE COLLECTE AU DIÉSEL

Tableau A2. Données relatives à la consommation des camions de collecte au diésel.

Région	Consommation	Commentaires
Île de Montréal	72 l/100 km	Statistique sur 13 camions avec un total de 87 114 km pour 62 735 litres de carburant (diésel). (Lagneau, 2018).
Île de Montréal	85 l/100 km	Vitesse de collecte moyenne de 15 km/h (Di Maria et Miracle, 2013).
Longueuil	100 l/100km	33 camions de collecte au diésel, 220 480 heures d'utilisation totale, 15 l/heure, 3 307 200 litres de diésel. 1 heure = 15 km, L/100km = 15 l/heure / 15 km * 100 = 100 l/100km. (Donnée date de 2009). (Ville de Longueuil, 2013a).
Laval	100 l/100km	1500 portes par véhicule, 200 km par véhicule pour une consommation moyenne de 200 litres de diésel. (Daoust, 2020).
Victoriaville	126 l/100km	Analyse consommation camion de collecte à Victoriaville collecte semi-urbaine, distance du centre de 5km. 109,5 km par jour en 9 heures d'opérations, vitesse moyenne de 12,5 km/h, 1022 portes. (Arsenault, 2008).
Drummondville	130 l/100km à 160 l/100km	1 300 km de collecte pour une consommation de 1 700 litres (sur une année). Pour une vingtaine de collecte en période estivale, 452 km de collecte pour une consommation de 720 litres. (Fullum, 2019)

ANNEXE 3. POURCENTAGE DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS ATMOSPHÉRIQUES EN FONCTION DE L'ORIGINE DU BIODIÉSEL (B20)

Tableau A3. Pourcentage de réduction des émissions atmosphériques en fonction de l'origine du biodiésel (B20) (extrait de STM, 2003)

Emissions atmosphériques	Origine animale	Origine végétale	A base d'huile de friture usagée
CO2 émis	0,8 %	0,9 %	0,2 %
Particules PM	7 %	15 %	17 %
Monoxyde de carbone CO	25 %	30 %	27 %
Hydrocarbures HCT	30 %	25 %	20 %
Oxydes d'azote NOx	2,5 %	5 %	-2,5 %
Particules fines PM2,5	12 %	15 %	15 %
Sulfates SO4	17 %	15 %	16 %
Hydrocarbures aromatiques polycycliques HAP	30 %	23 %	10 %

**ANNEXE 4. ENERGIE NÉCESSAIRE POUR L'UTILISATION DES ÉQUIPEMENTS DE COLLECTE
(COMPACTAGE ET BRAS MÉCANISÉ)**

	Débit compacteur (gmp)	Débit bras (gmp)	Pression (Psi)	Puissance compacteur (kW)	Puissance Bras (kW)	Source
Système de Durabac (benne cylindrique)	16,3	16,3	2500	18	18	Durabac, 2020
Système Labrie (L'Automizer Right Hand)	20,4	16,3	3000	27	21	http://www.labriegroup.com/literature/fr/specs_AURH_fr.pdf
Système Labrie (L'Automizer XF "Transformer")	20	16	3000	26	21	http://www.labriegroup.com/literature/fr/feuille_fr_XFMR.pdf
Durée du cycle compactage (s)	12	Moyenne du cycle de compaction des modèles de benne				
Durée du cycle bras (s)	8	Moyenne du cycle d'utilisation du bras des bennes				
Nombre de compactage	1280	Donnée de l'étude de Arsenault, 2008				
Nombre de sortie du bras	1220	Donnée de l'étude de Arsenault, 2008				
Energie Compactage (kWh)	100	Energie calculée avec la puissance hydraulique moyenne développé par les modèles de benne				
Energie Bras (kWh)	54	Energie calculée avec la puissance hydraulique moyenne développé par les modèles de benne				
	Hydraulique	Electrique	Réduction %			
Energie totale (kWh)	154	46	30 %	1 L de diésel équivaut à 10kWh avec le rendement moteur 3,5 kWh		
Nombre de porte	1022	1000				
Energie tot/nb de porte (kWh)	0,15	Energie total consommée en kWh pour alimenter les équipements par porte				
Energie tot/100km (kWh/100km)	141	Energie total consommée en kWh pour alimenter les équipements par 100km				
Consommation diésel l/100km	40	Energie total consommée en l/100km de diésel				
Consommation diésel total (l/100km)	126	Donnée de consommation réel du camion lors de l'étude de Arsenault, 2008				
Route seulement (l/100km)	86	Energie consommée si absence de compaction et pas d'utilisation du bras				

ANNEXE 5. DÉTAILS DES PROJETS DE CAMION ÉLECTRIQUE DE COLLECTE CIRCULANT DANS LE MONDE

Région du projet	Description	Source
Métropole de Lyon, France	Début du projet au mois de juillet 2019, dans la commune de Meyzieu. Renault Truck ZE de 26T, batterie de 200 kW (autonomie nécessaire pour une collecte urbaine). Recharge totale en 8h (prise classique 380 V, 32 A triphasé), prise Combo CCS de 150 kW seulement en 1 à 2 heures. 300 à 800 bacs à collecter. Sollicitation du moteur pour freiner permet de limiter l'usure des freins et les émissions associés (camion EURO6 diesel, principale émission de particules lié à l'usure des pneus et des freins). Optimisation de la carrosserie pour la masse, insonorisation de la zone arrière pour confiner le bruit de chute des déchets. Gain de 3dB. Moteur électrique de 350 ch.	France Routes, 2018 et France Routes, 2019.
Lyon, France.	Circulation d'un mini camion de collecte de 4,5 tonnes opéré par l'entreprise Nicollin. La maintenance se fait sur le site de Renault Trucks à Lyon. Aucune émission polluante atmosphérique et circule sans occasionner de nuisances sonores, moteur asynchrone de 47 kW sous 400 V, assurant la récupération d'énergie lors de la décélération. Autonomie de 50 kilomètres, vitesse maximum limitée à 70 km/h, batterie lithium-ion/phosphate de fer d'une capacité totale de 42 kWh. Électricité est utilisée pour mouvoir le véhicule et pour le système de compactage des déchets.	Industrie & Technologies, 2014.
Londres, Angleterre	Camion électrique fin 2019 dans la ville de Londres. 7 véhicules de collecte basés sur la carrosserie de Dennis Elite. À Sheffield, 2 camions tout électriques en test à Westminster. Problème lors de la recharge de plusieurs véhicules électriques sur le même site : nécessite plus de puissance ce qui augmente les coûts de l'infrastructure de ravitaillement. Coût de l'électrique est plus élevé à l'achat mais se rentabilise sur la facture énergétique. (Camion	Circular. (2019).

Région du projet	Description	Source
	électrique 2 fois plus élevé par rapport au diesel). Rentable au bout de 7 ans : carburant sur une journée 15 £. Camion hybride à privilégier pour les circuits plus long.	
Sheffield, Angleterre	Chargé à partir de l'énergie électrique produit à l'incinérateur de déchet, entre dans un style d'économie circulaire. Les camions électriques sont la solution la plus rapide et la plus économique pour réduire les émissions polluantes dans les villes. L'usure des freins est plus lente et permet de réduire les émissions de particules (pneus et freins). La conversion d'un camion à bennes en électricité équivaut à retirer 30 voitures à moteur diesel des rues. Camion de collecte durée de vie de 7 ans, le convertir en électrique est rentable puisque cela permet de réutiliser le même camion pour encore 7 ans. Le coût de remplacement d'un camion (envoi du véhicule à l'étranger et dépouillement des pièces) coût plus chère que de le convertir en électrique.	Dando, 2019, 4 septembre.
Cambridge, Angleterre	Coût à l'achat de 350 000 à 400 000 £. Possède 50 camions et 18 balayeuses de rue pour un coût total de 46 000 £ /mois. Les camions actuels coûtent 185 000 £ chacun et sont conformes aux normes environnementales mais coûtent chère à l'opération. Avec une consommation de 45 l/100km, cela coûte plus de 760 \$/camion/mois, 1,30 £/L : 580 litres par camion et 45 l/100 km, 1 200 km par camion environ. La conversion à électrique permet de profiter d'un coût de carburant beaucoup plus bas, et l'entreprise a la possibilité de se procurer des panneaux solaires pour réduire encore ce coût.	BBC News. (2020)
Rotterdam, Pays-Bas	Moteur de 210 kW, 170 kWh de batterie, suffisant pour les distances puisque les camions retournent au dépôt à chaque heure. Plus d'importance sur la charge rapide des camions. Charge à 80% en 30 minutes. Capacité du chargeur rapide de 240 kW. Système tout électrique, hydraulique perte de charge et pas efficace. 2 camion tout électrique avec une	Dimitrova, 2019, 7 juin

Région du projet	Description	Source
	autonomie de 100 km.	
Ville de Belmont, Australie	Camion électrique opéré par Suez, capacité de 1 200 bacs par jour. Economie d'environ 35 000 litres de diesel par an, 90 tonnes de CO2 évités par an. Batterie de 230 kWh permet d'avoir une autonomie de 200 km, consommation de 115 kWh/100km. Améliore la durée de vie des freins, passe de 4 mois à 2 ans.	SEA Electric, 2019
Los Angeles, Californie	La circulation des camions lourds en Californie est l'origine de 49 tonnes de NOx par jour sous environ 15 % des émissions de toute la Californie. Projet de test de 5 camions de collecte électrique avec une batterie de 188 kWh, une autonomie de 124 km. Actuellement, la collecte est effectuée par plus de 8 000 camions en Californie.	BYD Motors, 2015
Greenwich, Angleterre	Projet d'électrifier un camion diesel de collecte en fin de vie. Début du projet en juillet 2018. La demande pour les camions de collecte augmente de 20 % depuis 2017. Convertir des camions usagés pourrait être une solution. Camion diesel a une consommation entre 94 l/100km jusqu'à 170 l/100km. Le coût sur 7 ans montre que l'option d'électrifier un ancien camion diesel est le plus rentable : 299 000 £ contre 601 000 £ pour remplacer et opérer un nouveau camion diesel.	Magtec, 2017
Chicago, Illinois	Depuis 2012, Chicago utilise des camions électriques pour opérer la collecte des déchets et des matières recyclables. Le coût initial d'achat d'un camion électrique est de 500 000 \$ US. Utilise une batterie Lithium Sodium Nickel et Chlore, de 200 kWh. En 2014, le prix d'une batterie était d'environ 410 \$/kWh, en 2025 ils estiment que le prix va chuter à 150 \$/kWh. Ainsi le coût total du camion va diminuer pour se rapprocher de son homologue diesel (250 000 \$ US). Commence à être rentable au bout de 150 000 km parcourue, au bout de 180 000 km le collecteur fait des économies de 50 000 \$.	Moultak, M., Lutsey, N., Hall, D. (2017). Global Green, 2015

Région du projet	Description	Source
Sparsborg, Norvège	Deux camions électriques de collecte permettent de sauver jusqu'à 60 tonnes de CO2 chacun par année.	Moultak, M., Lutsey, N., Hall, D. (2017).
Sacramento, Californie	Première ville des États-Unis qui a déployé des camions tout électriques. Permet de réaliser des économies de 23 000 litres de diesel, soit environ 30 000 \$ US par an.	Moultak, M., Lutsey, N., Hall, D. (2017).
Brooklyn, New-York	Test d'un camion électrique Mack. Action rentre dans les objectifs de réduction des émissions GES de la ville de New-York (80 % d'ici 2035 en se basant sur les émissions de 2005). Batterie au lithium nickel manganèse cobalt, l'autonomie et la capacité de la batterie est gardé sous silence. Mais le camion dispose d'une puissance de 260 kW, et 4 batteries d'au moins 50 kWh, il est possible d'imaginer une consommation de 160 kWh/100km, pour une autonomie de 80 miles soit 124 km.	Fleet équipement, 2020
Saint-Denis, La Réunion, France	Circulation d'un mimi camion de collecte électrique de 2 tonnes. Consommation : 8,6 kWh/10,4 km = 82,6 kWh/100km, en circulation dans l'un des secteurs le plus urbanisé de l'île, difficile d'accès. Les tests d'un camion électrique sont effectués sur des petits circuits de collecte. Autonomie entre 10,4 et 17 km suivant la capacité de la batterie. Le véhicule est équipé d'une benne de compaction hydro-électrique, son fonctionnement est électrique (moteur de 2,5 kW, 24 V et 110 A). Le circuit prévu est plutôt un circuit court pour éliminer les rues très problématiques. Le chef d'équipe est affecté à sa collecte (donc il doit partir après le démarrage des autres camions et revenir avant le retour des autres, donc la tournée sera très courte). Recharge lente sur prise courante en France (7h à 9h suivant la taille de la batterie). Batterie garantie 4 ans ou 1 500 cycles, soit 15 600 km à 25 500 km.	Discussion avec Bruno Esparon, responsable de la cellule projet de SUEZ RV Réunion, janvier 2020. Et Willy Morel, chargé de projet, SUEZ RV Réunion, janvier 2020.

ANNEXE 6. DÉTAILS DES DONNÉES DES SERVICES DE COLLECTE (MRC DE JOLIETTE, VILLE DE SHERBROOKE, AGGLOMÉRATION DE MONTRÉAL)

MRC JOLIETTE				
Distance route (km)	835			Source :
Unifamiliale	16965			MRC de Joliette, 2018
Multi logement	3870			MRC de Joliette, 2018
Temps collecte (h)	55			MRC de Joliette, 2018
Vitesse moyenne de collecte (km/h)	15			
	Déchet	Recyclage	Matière organique	
Nombre de collecte	26	52	39	MRC de Joliette, 2018
Coût collecte à l'année (2013)	1 246 440 \$	1 374 280 \$	894 880 \$	MRC de Joliette, 2018
Tonnage collectée (2014 déchets, 2017 recyclage et matière organique)	26386	7241	8509	MRC de Joliette, 2018
Tonnage/collecte	1015	139	218	
Nombre de bac (360L)	20835	20835	20835	
Coût à la tonne (\$/tonne)	47 \$	190 \$	105 \$	
Nb bacs/collecte	16668	16668	13126	
Poids moyen d'un bac 360L (kg)	54,4	13,17	9,47	Appel d'offres
Nb bacs/km	19	19	15	
Tonnage/km	1,22	0,17	0,26	
Distance centre de traitement (km)	20	15	20	
Distance circuit avant vidage (km)	12	84	54	
Nb trajet centre de traitement/collecte	72	10	16	
Distance transport/collecte	2900	298	623	
Distance parcourue/collecte	3735	1133	1458	
Coût/distance parcourue	13 \$	23 \$	16 \$	
Nombre de camion nécessaire	6	3	3	
Distance transport total/camion	483	133	208	
Distance collecte total/camion	139	278	278	
Nb bacs/camion	2644	5288	4175	
Distance collecte/jour/camion	124,49	75,56	97,22	
Tonnage/jour/camion	34	9	15	
Nb trajet centre de traitement/jour/camion	3	1	2	
				TOTAL
Km parcourus sur une année par camion	97099	58936	56876	212911
	16 183	19 645	18 959	

VILLE DE SHERBROOKE

Distance route (km)	1100
Unifamiliale	35700
Multilogement	8428
Temps collecte (h)	117
Vitesse moyenne de collecte (km/h)	9

Source :
Ville de Sherbrooke,
2020
Ville de Sherbrooke,
2016
Ville de Sherbrooke,
2016

	Déchet	Recyclage	Matière organique	
Nombre de collecte	15	28	38	Ville de Sherbrooke, 2016
Coût collecte à l'année (2013)	835 915 \$	2 098 717 \$	730 263 \$	Ville de Sherbrooke, 2016
Tonnage collectée (2013)	28811	16148	14479	Ville de Sherbrooke, 2016
Tonnage/collecte	1921	577	381	
Nombre de bac (360L)	44128	55430	41808	Appel d'offres
Coûts à la tonne (\$/tonne)	29 \$	130 \$	50 \$	
Nb bacs/collecte	35302	43800	26339	
Poids moyen d'un bac 360L (kg)	54,4	13,17	9,47	
Tonnage/km	1,75	0,52	0,35	
Distance centre de traitement (km)	10	10	45	
Distance circuit avant vidage (km)	7	23	35	Ville de Sherbrooke, 2016
Nb trajet centre de traitement/collecte	137	41	27	
Distance transport/collecte	2744	824	2449	
Distance parcourue/collecte	3844	1924	3549	
Coût/distance parcourue	14 \$	39 \$	5 \$	
Nombre de camion nécessaire	10	7	7	
Distance transport total/camion	274	118	78	
Distance collecte total/camion	110	157	157	
Distance collecte/jour/camion	76,88	54,97	101,41	
Tonnage/jour/camion	38	16	11	
Nb trajet centre de traitement/jour/camion	4	2	1	
Km parcourus sur une année par camion	57659	53869	134879	TOTAL :
	5 766	7 696	19 268	246406

AGGLOMERATION DE MONTREAL

Distance route (km)	10100
Unifamiliale	303435
Multi logement	939854
Temps collecte (h)	3032
Vitesse moyenne de collecte (km/h)	3,3

Source :
Lagneau, 2018
Ville de Montréal,
2019
Ville de Montréal,
2019

	Déchet	Recyclage	Matière organique	
Nombre de collecte	52	52	52	Appel d'offres des arrondissements
Coût collecte à l'année (2013)	146 908 084 \$	68 316 830 \$	15 061 982 \$	Ville de Montréal, 2019
Tonnage collectée (2018)	929798	432385	95329	Ville de Montréal, 2018a
Tonnage/collecte	17881	8315	1833	
Poids moyen d'un bac (kg)	51	15,8	8	Appel d'offres des arrondissements
Tonnage/km	1,77	0,82	0,18	
Distance centre de traitement (km)	22	22	22	Lagneau, 2018
Distance circuit avant vidage (km)	8	17	77	
Nb trajet centre de traitement/collecte	1490	693	153	
Distance transport/collecte	65563	30489	6722	
Distance parcourue/collecte	75663	40589	16822	
Coût/distance parcourue	37 \$	32 \$	17 \$	
Nombre de camion nécessaire	183	133	95	Appel d'offres des arrondissements
Distance transport total/camion	358	229	71	
Distance collecte total/camion	55	76	106	
Distance collecte/jour/camion	82,69	61,04	35,41	
Tonnage/jour/camion	20	13	4	
Nb trajet centre de traitement/jour/camion	2	2	1	
				TOTAL
Km parcourus sur une année	3934459	2110612	874740	6919811
par camion	21 500	15 869	9 208	

ANNEXE 7. DÉTAILS DES DONNÉES UTILISÉS POUR L'ANALYSE DES TECHNOLOGIES

	Biodiésel	Diésel	CNG	Hybride	Electrique	Hydrogène
Puit au réservoir	19,369 gCO2eq/GJ (O'Connor, 2011) émission du biodiésel de colza au Canada, dépend fortement des intrants mis dans la culture.	0,66 kgCO2eq/L (Équiterre, 2009)	18,3 gCO2eq/MJ pire des cas, GNL importé, (CIRAIG, 2018)	0,66 kgCO2eq/L (Équiterre, 2009)	22 gCO2eq/kWh (Hydro-Québec, 2015).	9-19 kgCO2eq/kgH2 (Institut de Recherche en Economie contemporaine, 2020)
Opération (conversion énergétique et sortie en pot d'échappement)	2472 gCO2/L, 0,11 gCH4/L, 0,151 gN2O/L (Environnement et changement climatique Canada, 2019)	Système dépolluant perfectionné : 2 681 gCO2/L, 0,051 gCH4/L, 0,22gN2O/L (Environnement et changement climatique Canada, 2019)	1 889 gCO2eq/m3 (Transition Énergétique Québec, 2019)	Système dépolluant perfectionné : 2 681 gCO2/L, 0,051 gCH4/L, 0,22gN2O/L (Environnement et changement climatique Canada, 2019)		
Construction et assemblage du véhicule		364 tCO2/M\$, 0,015 tCH4/M\$, 0,36 tN2O/M\$ (Exiobase, 2015)				
Extraction matière première				Super condensateur	175 kgCO2eq/kWh batterie (The International Council on Clean Transportation, 2018).	
Fin de vie				Super condensateur	Batterie de 480kWh, 3200 kg, 0,4 kgCO2eq/kWh	
Maintenance		140 tCO2/M\$, 0,0074 tCH4/M\$, 0,15 tNO2/M\$ (Exiobase, 2015)				
Equipement de recharge		380 tCO2/M\$, 1,05 tCH4/M\$, 26,42tN2O/M\$ (Exiobase, 2015)				
Efficacité station de recharge	100 %	100 %	98 % (Argonne National Laboratory, 2014).	100 %	95 % (Breezcar, 2018)	98 % (Argonne National Laboratory, 2014).
Emission due à la compression			0,94 gCO2eq/MJ (Argonne National Laboratory, 2014).			

	Biodiésel	Diésel	CNG	Hybride	Electrique	Hydrogène
Prix du carburant	1,00 \$/litre de B100 (Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, 2019c). , 1,276 \$/litre	1,31 \$/litre (Régie de l'énergie, 2020)	1,018 \$/kgGNC (Sani-Estrie, 2019)	1,31 \$/litre (Régie de l'énergie, 2020)	0,1079 \$/kWh (taxes incluses (Hydro-Québec, 2019a)	5 \$/kg (Institut de Recherche en Economie contemporaine, 2020)
Station de ravitaillement	Sans surcoût	Sans surcoût	1 500 000 \$ pour 20 camions (La Presse, 2017)	Sans surcoût	1 700 \$/camion (Bornes électriques Québec, 2019)	3 600 000 \$ pour 20 camions (Fuel Cells and Hydrogen, 2017)
Consommation	72-130 l/100km	72-130 l/100km	70-100 kg/100 km (Fondation Tuck, 2019)	-15 %	120 kWh/100km (La Compagnie Lion électrique, 2020)	6 - 9 kg/100km (Fuel Cells and Hydrogen, 2017)
Achat	250 000 \$/par camion (Lagneau, 2018)	250 000 \$/par camion (Lagneau, 2018)	300 000 \$/par camion (La Presse, 2017) Subvention pour le coût supplémentaire (écocamionnage) jusqu'à 30 000 \$ (Ministère des Transports, 2019)	+134 000 \$/camion (Danna, 2011). Subvention pour le coût supplémentaire (écocamionnage) jusqu'à 75 000 \$ (Ministère des Transports, 2019)	700 000 \$/camion (Laurin, 2020). Subvention pour le coût supplémentaire (écocamionnage) jusqu'à 75 000 \$ (Ministère des Transports, 2019)	720 000 \$/camion (Fuel Cells and Hydrogen, 2017). Pas de subvention
Durée de vie (an et km)	10 ans/500 000 km (Lagneau, 2018)	10 ans/500 000 km (Lagneau, 2018)	10 ans/500 000 km (Lagneau, 2018)	10 ans/500 000 km (Lagneau, 2018)	12 ans/4 000 cycles/1 600 000 km (Laurin, 2020)	12 ans/600 000 km (Fuel Cells and Hydrogen, 2017)
Entretien	0,13 \$/km (Lagneau, 2018) Changement de filtre : +100 \$/véhicule première année (STM, 2003)	0,13 \$/km (Lagneau, 2018)	-10 % : 0,12 \$/km (Théolis, 2020)	Prolonger la durée de vie des moteurs (50 % moins d'heures d'utilisation) (Derichebourg Environnement, 2018)	- 60 %, 0,05 \$/km (La Compagnie Lion électrique, 2020). Durée de vie des freins multipliés par 3, pas d'huile, pas de tuyau ou boyau, etc. (Laurin, 2020)	0,75\$/km (Fuel Cells and Hydrogen, 2017)
Emissions polluantes	-5 % Nox, -30 % CO, 2 % en sortie d'échappement de CO2 B20, particule - 30 %, HAP -13 % (STM, 2002 et STM, 2003)		-25 % Co2, -70 % Nox, -97 % PM, -99 % SO2 (Gaz Métro, 2016, Sani-Estrie, 2018, Énergir, 2016)	-15 %	Émissions indirectes par la production d'électricité	Émissions indirectes par la production d'électricité
Autonomie	Comparable au diésel	Comparable au diésel	280 à 380 litres de diésel, 200 à 300 km par jour (Théolis, 2020)	Comparable au diésel	jusqu'à 400 km, 1 000 bacs	autonomie de 360 km (Fuel Cells and Hydrogen, 2017)
Bruit	100 dB	100 dB	- 10 dB (Gaz Métro, 2016, Sani-Estrie, 2018 et Énergir, 2016)	Réduit les impacts sonores (moins de bruit à l'arrêt et au démarrage)	Réduit les impacts sonores sur l'ensemble du trajet	Réduit les impacts sonores sur l'ensemble du trajet
Imagine développé	Neutre	Neutre	Positive : réduction jusqu'à 25 % des GES	Positive : réduction jusqu'à 30 % des GES, pas de bruit, efficacité énergétique	Positive : réduction des GES si utilisation d'électricité verte, efficacité énergétique, pas de bruit	
Fin de vie	Neutre	Neutre	Neutre	Batterie : pas encore d'usine de recyclage au Québec. Recyclage en Colombie-Britannique (Propulsion Québec, 2019)	Batterie : pas encore d'usine de recyclage au Québec. Recyclage en Colombie-Britannique (Propulsion Québec, 2019)	

ANNEXE 8. DÉTAILS DES CALCULS POUR LES ÉMISSIONS DE GES SUR L'ENSEMBLE DU CYCLE DE VIE DES TECHNOLOGIES ÉTUDIÉES

	Diésel (L)	B20 (L)	Gaz naturel (kg)	Hybride (L)	Electrique (kWh)	Hydrogène (kg)
Consommation (Unité/km)	7,2	7,2	7	6,12	1,2	0,06
Durée de vie (en km)	500 000	500 000	500 000	500 000	500 000	500 000
Investissement (\$)	250 000 \$	250 000 \$	375 000 \$	384 000 \$	701 700 \$	900 000 \$
Véhicule	250 000 \$	250 000 \$	300 000 \$	384 000 \$	700 000 \$	720 000 \$
Station de recharge/véhicule	0 \$	0 \$	75 000 \$	0 \$	1 700 \$	180 000 \$
par km	0,50 \$	0,50 \$	0,75 \$	0,77 \$	1,40 \$	1,80 \$
Maintenance (\$/km)	0,13 \$	0,13 \$	0,12 \$	0,13 \$	0,05 \$	0,75 \$
Capacité batterie (kWh)	0	0	0	0	480	0

Origine des carburants

Les données d'émission pour la production, le transport et la distribution des carburants se basent le logiciel de GHGenius 5.0f datant de février 2020. Les données utilisées dans notre étude datent de 2018. Elles tiennent compte de l'ensemble du cycle de vie du carburant (de son extraction jusqu'au consommateur). Respectivement pour le diésel, le gaz naturel et l'hydrogène, les émissions sont de 23 342 gCO₂eq/GJ, 12 292 gCO₂eq/GJ et 107 483 gCO₂eq/GJ. Pour le biodiésel, les émissions de GES dépendent de l'origine du biodiésel : graisse animale et huile végétale récupéré, huile végétale cultivé uniquement pour la production de biodiésel, d'algues, etc. Au Québec, il existe une unité de production de biodiésel à partir de gras d'animal et d'huile usagée. (Rothsay, 2019). L'hypothèse est que le biodiésel utilisé provient à 50 % de d'huile et de gras recyclé et de 50 % d'huile de soja. Ce qui fait une émission de 10 190 gCO₂eq/GJ. (GHGenius, 2020).

En convertissant les émissions en gCO₂eq/unité de consommation, les émissions respectives des carburants (diésel, biodiésel, gaz naturel, électricité, hydrogène) 0,609 gCO₂eq/L, 0,286 gCO₂eq/L, 0,408 gCO₂eq/kg, 22 gCO₂eq/kWh et 0,750 gCO₂eq/kg. La donnée pour l'électricité provient de l'empreinte carbone du mix énergétique d'Hydro-Québec. (Hydro-Québec, 2015).

Opération : consommation des carburants

Les données de la phase de combustion proviennent de l'inventaire national des gaz à effet de serre au Canada publiés en 2019. Un camion diésel avec un système dépolluant perfectionné a été choisi. Les

émissions respectives du diesel, du biodiesel (B100) et du gaz naturel sont les suivantes : 2 747 gCO₂eq/L, 2 472 gCO₂eq/L, et 2 361 gCO₂eq/kg. (Environnement et changement climatique Canada, 2019 et Transition Énergétique Québec, 2019). Il est considéré que l'électricité et l'hydrogène ne produisent pas de GES lors de leur utilisation. Le biodiesel (B20) est utilisé dans notre cas, cela correspond à un mélange de 20 % de B100 et de 80 % de diesel conventionnel. L'émission est donc de 2 692 gCO₂eq/L.

Chaque type de camion a une consommation en carburant différente. Dans notre cas, une consommation moyenne de 72 l/100km a été choisie pour le diesel. Il est considéré que le biodiesel a sensiblement la même consommation (dans les faits comme le biodiesel a moins d'énergie par litre, il consomme un peu plus). La consommation du gaz naturel provient de la flotte des données de 2019, à savoir entre 70 kg/100km (Fondation Tuck, 2019). La consommation des camions électriques provient des données du constructeur LION, à savoir 120 kWh/100km. (La Compagnie Lion électrique, 2020). Pour l'hydrogène, les données proviennent d'une étude faite sur le terrain en Europe, soit 6 kg/100km (Fuel Cells and Hydrogen, 2017).

Construction et assemblage des camions

Les données d'émission pour la construction et l'assemblage des camions se basent le logiciel de GHGenius 5.0f datant de février 2020. En tenant compte du cycle de vie des matériaux, de l'assemblage et du transport de ces matériaux, les camions lourds ont une émission de 4 228 gCO₂eq/kg de véhicule (indépendamment du type d'énergie utilisé : diesel, biodiesel, gaz naturel, électricité, hydrogène).

Ce qui fait la différence, ce sont les matériaux utilisés pour le stockage de l'énergie. Respectivement pour le diesel, le gaz naturel, l'électricité et l'hydrogène, les données sont 2 129gCO₂eq/kg, 10 184 gCO₂eq/kg, 16 636 gCO₂eq/kg et 5 575 gCO₂eq/kg. (GHGenius, 2020). Un camion de 26 tonnes sera considéré pour notre étude (avec un poids moyen à vide de 12 tonnes, par exemple le camion LION électrique pèse à vide 11 158 kg).

Construction, assemblage et utilisation des station de ravitaillement

Comme il est très difficile d'obtenir des données exhaustives et pertinentes sur les émissions de GES liés à la construction et l'assemblage des station de ravitaillement, il a été fait comme hypothèse que les GES émis dépendent des coûts de la station. Ainsi d'après les données de la base Exiobase, un million de dollar (CAN) investi en Amérique du Nord dans des bornes de recharge électrique ou dans une station de ravitaillement GNC produit en moyenne 8 279 tCO₂eq. (Exiobase, 2015). Cela représente 8 279 gCO₂eq/\$. Lors de la recharge ou du ravitaillement, il y a toujours un pourcentage de perte. Pour le gaz naturel, l'hypothèse faite est que 2 % du gaz naturel (CH₄) s'échappe à l'atmosphère, cela

équivalent à 0,032 gCO₂eq/kg lors de la recharge. (Argonne National Laboratory, 2014). Pour l'électricité, la borne de recharge perd jusqu'à 5 % de l'énergie sous forme de chaleur. (Breezcar, 2018).

Maintenance

Les données d'émissions de GES pour la maintenance des véhicules sont difficiles d'accès. Dans la littérature, l'analyse se fait avec les émissions de GES des éléments à remplacer et les intervalles de maintenance. Certains éléments du véhicule doivent être remplacés selon des intervalles précis. Dans notre cas, les intervalles de maintenance sont compilés dans le tableau suivant. Les données disponibles proviennent d'une étude sur les véhicules électriques au Japon. L'hypothèse faite est que les données sont sensiblement les mêmes à un niveau mondial pour le remplacement des pièces usagées. Notre étude intègre seulement quatre composants à renouveler qu'on suppose être universelle à tous les véhicules sauf pour l'huile moteur où le camion électrique n'en dispose pas.

Tableau A8. Liste des émissions par composants (extrait de Kawamoto et al., 2019)

Éléments	Intervalle de maintenance (km/maintenance)	Emissions (kgCO ₂ /maintenance) (Life Cycle Assessment Society of Japan, 2015)	Emissions sur le cycle de vie (500 000 km)
Pneu	40 000	108	1350
Acide de plomb (batterie)	50 000	19,5	195
Huile moteur	10 000	3,22	161
Eau du radiateur	27 000	7,03	185

La batterie Lithium-ion a une durée de vie estimée à 6 000 cycles, soit 1 600 000 km, ce qui dépasse amplement la durée de vie utilisée dans notre analyse. (La Compagnie Lion électrique, 2020).

Pour affiner l'étude, la base de données Exiobase fournit une émission GES par rapport aux dépenses liées à la maintenance des véhicules. Comme les coûts de maintenances pour les différents véhicules sont accessibles, il est facile d'obtenir des émissions relatives à chaque type de technologie. Ces données viennent s'ajouter aux éléments à remplacer. L'étude japonaise ne compile pas les données pour les freins, ni les éléments pour le circuit hydraulique, ni le changement d'huile du circuit hydraulique, etc. La base de données Exiobase fournit une émission de 185 gCO₂eq/\$ pour la maintenance des véhicules. (Exiobase, 2015).

Fin de vie

L'hypothèse faite est que les camions indépendamment de leur type de carburant devront être acheminés à une plateforme de démantèlement. En supposant qu'un centre de démantèlement est à une distance moyenne de 40 km du centre de dépôt des véhicules et que les camions en fin de vie sont transportés par voie routière, le transport vers le centre de démantèlement demande 0,06 MJ/kg. Pour un camion de 12 tonnes, cela représente 720 MJ, soit 19 litres de diésel. (UBC Sustainability Scholar, 2018). L'énergie nécessaire pour opérer le démantèlement est d'environ 0,37 MJ/kg, soit 4 440 MJ, cela équivaut à 1 233 kWh, soit 27 kgCO₂eq. (Bakker, 2010).

La batterie est supposée être envoyée en Colombie-Britannique pour être recyclée suivant le procédé d'hydrométallurgie. Une batterie lithium-ion possède une densité énergétique de 250 Wh/kg (CIRAIG, 2016). Le transport d'une batterie de 480 kWh avec un poids moyens de 1 920 kg par train libère 140 gCO₂eq/kg. (Compagnie des chemins de fer nationaux du Canada, 2020). Le procédé de traitement libère 2 494 gCO₂eq/kg de batterie (234 due au démantèlement, 586 pour la séparation des cellules, 213 pour la séparation de la cathode, et le procédé libère 1 461). (Buchert, et al., 2011). Il est possible de revoir cette donnée à la baisse puisque l'extraction de matériaux dans la batterie permet d'éviter de l'extraction minière qui demande plus en énergie et donc qui libère plus de GES. En considérant cet évitement, le procédé de recyclage est un puit de carbone qui capte 1 035 gCO₂eq/kg. (Buchert, et al., 2011).

**ANNEXE 9. DÉTAILS DES GAINS ÉCONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX DES TECHNOLOGIES ÉTUDIÉS
POUR L'AGGLOMÉRATION DE MONTRÉAL, LA VILLE DE SHERBROOKE, ET LA MRC DE
JOLIETTE**

Cas	Agglomération de Montréal		Ville de Sherbrooke	MRC de Joliette		
Nombre de camion	183		10	6		
Distance à parcourir	6 919 811		246 046	212 911		
	Diésel (L)	B20 (L)	Gaz naturel (kg)	Hybride (L)	Electrique (kWh)	Hydrogène (kg)
Consommation (Unité/km)	7,2	7,2	7	6,12	1,2	0,06
Prix du carburant (\$/Unité)	1,310 \$	1,248 \$	1,018 \$	1,310 \$	0,108 \$	5,000 \$
Maintenance (\$/km)	0,13 \$	0,13 \$	0,12 \$	0,13 \$	0,05 \$	0,75 \$
Empreinte carbone (gCO2eq/km)	19 963	19 567	13 598	17 064	550	377
COV (g/km)	2,190	1,533	1,643	1,862	0,000	0,000
SO2 (g/km)	0,048	0,040	0,0005	0,041	0,000	0,000
Nox (g/km)	4,380	4,161	1,314	3,723	0,000	0,000
CO (g/km)	1,320	0,924	0,990	1,122	0,000	0,000
Particules (g/km)	0,010	0,007	0,0003	0,009	0,0003	0,0003
HC (g/km)	0,720	0,626	0,540	0,612	0,000	0,000
Autonomie (km)	400	400	400	400	400	360

MONTREAL	Diésel	Biodiésel (B20)	Gaz naturel (CNG)	Hybride	Électrique	Hydrogène
	ECONOMIQUE					
Investissement total (\$)	45 750 000 \$	45 750 000 \$	63 135 000 \$	56 547 000 \$	114 686 100 \$	164 700 000 \$
par véhicule (\$)	250 000 \$	250 000 \$	300 000 \$	384 000 \$	700 000 \$	720 000 \$
Station de recharge/véhicule (\$)	0 \$	0 \$	75 000 \$	0 \$	1 700 \$	180 000 \$
subvention (\$)	0 \$	0 \$	30 000 \$	75 000 \$	75 000 \$	0 \$
Frais d'exploitation (\$/an)	66 167 230 \$	63 078 226 \$	50 140 948 \$	56 377 081 \$	1 241 968 \$	7 265 801 \$
Énergie (\$)	65 267 654 \$	62 178 651 \$	49 310 571 \$	55 477 506 \$	895 977 \$	2 075 943 \$
Maintenance (\$)	899 575 \$	899 575 \$	830 377 \$	899 575 \$	345 991 \$	5 189 858 \$
Retour sur investissement (an)	Référence		1,08	1,10	1,06	2,02
Gain par rapport au diésel (\$/an)	0 \$	3 089 003 \$	16 026 282 \$	9 790 148 \$	64 925 262 \$	58 901 428 \$
% gain	REF	4,67%	24,22%	14,80%	98,12%	89,02%
Coût pour la société (\$/an)	5 543 190 \$	5 429 254 \$	3 766 605 \$	4 737 952 \$	152 687 \$	104 689 \$
GES (\$)	5 525 702 \$	5 415 963 \$	3 763 713 \$	4 723 087 \$	152 328 \$	104 330 \$
PM (\$)	11 957 \$	8 370 \$	359 \$	10 164 \$	359 \$	359 \$
Nox (\$)	3 587 \$	3 408 \$	1 076 \$	3 049 \$	0 \$	0 \$
CO (\$)	1 046 \$	732 \$	785 \$	889 \$	0 \$	0 \$
O3 (\$)	897 \$	780 \$	673 \$	762 \$	0 \$	0 \$
% gain	REF	2,06%	32,05%	14,53%	97,25%	98,11%
	ENVIRONNEMENT					
GES émis (tCO2eq/an)	138 143	135 399	94 093	118 077	3 808	2 608
COV (kg/an)	15 154	10 608	11 366	12 881	0	0
SO2 (kg/an)	332	276	3	282	0	0
Nox (kg/an)	30 309	28 793	9 093	25 762	0	0
CO (kg/an)	9 134	6 394	6 851	7 764	0	0
Particules (kg/an)	69	48	2	59	2	2

MONTREAL	Diésel	Biodiésel (B20)	Gaz naturel (CNG)	Hybride	Électrique	Hydrogène
HC (kg/an)	4 982	4 335	3 737	4 235	0	0
COV (kg/an)	REF	30,00%	25,00%	15,00%	100,00%	100,00%
SO2 (kg/an)	REF	17,00%	99,00%	15,00%	100,00%	100,00%
Nox (kg/an)	REF	5,00%	70,00%	15,00%	100,00%	100,00%
CO (kg/an)	REF	30,00%	25,00%	15,00%	100,00%	100,00%
Particules (kg/an)	REF	30,00%	97,00%	15,00%	97,00%	97,00%
HC (kg/an)	REF	13,00%	25,00%	15,00%	100,00%	100,00%
% gain	MOYENNE	20,83%	56,83%	15,00%	99,50%	99,50%

VILLE DE SHERBROOKE	Diésel	Biodiésel (B20)	Gaz naturel (CNG)	Hybride	Électrique	Hydrogène
	ECONOMIQUE					
Investissement total (\$)	2 500 000 \$	2 500 000 \$	3 450 000 \$	3 090 000 \$	6 267 000 \$	9 000 000 \$
par véhicule (\$)	250 000 \$	250 000 \$	300 000 \$	384 000 \$	700 000 \$	720 000 \$
Station de recharge/véhicule (\$)	0 \$	0 \$	75 000 \$	0 \$	1 700 \$	180 000 \$
subvention (\$)	0 \$	0 \$	30 000 \$	75 000 \$	75 000 \$	0 \$
Frais d'exploitation (\$/an)	2 352 692 \$	2 242 857 \$	1 782 849 \$	2 004 586 \$	44 160 \$	258 348 \$
Énergie (\$)	2 320 706 \$	2 210 871 \$	1 753 324 \$	1 972 600 \$	31 858 \$	73 814 \$
Maintenance (\$)	31 986 \$	31 986 \$	29 526 \$	31 986 \$	12 302 \$	184 535 \$
Retour sur investissement (an)	Référence		1,67	1,69	1,63	3,10
Gain par rapport au diésel (\$/an)	0 \$	109 835 \$	569 843 \$	348 106 \$	2 308 532 \$	2 094 344 \$
% gain	REF	2,06%	32,05%	14,53%	97,25%	98,11%
Coût pour la société (\$/an)	197 098 \$	193 047 \$	133 928 \$	168 466 \$	5 429 \$	3 722 \$

VILLE DE SHERBROOKE		Diésel	Biodiésel (B20)	Gaz naturel (CNG)	Hybride	Électrique	Hydrogène
	GES (\$)	196 476 \$	192 574 \$	133 825 \$	167 938 \$	5 416 \$	3 710 \$
	PM (\$)	425 \$	298 \$	13 \$	361 \$	13 \$	13 \$
	Nox (\$)	128 \$	121 \$	38 \$	108 \$	0 \$	0 \$
	CO (\$)	37 \$	26 \$	28 \$	32 \$	0 \$	0 \$
	O3 (\$)	32 \$	28 \$	24 \$	27 \$	0 \$	0 \$
	% gain	REF	20,83%	56,83%	15,00%	99,50%	99,50%
ENVIRONNEMENT							
	GES émis (tCO2eq/an)	4 912	4 814	3 346	4 198	135	93
	COV (kg/an)	539	377	404	458	0	0
	SO2 (kg/an)	12	10	0	10	0	0
	Nox (kg/an)	1 078	1 024	323	916	0	0
	CO (kg/an)	325	227	244	276	0	0
	Particules (kg/an)	2	2	0	2	0	0
	HC (kg/an)	177	154	133	151	0	0
	COV (kg/an)	REF	30,00%	25,00%	15,00%	100,00%	100,00%
	SO2 (kg/an)	REF	17,00%	99,00%	15,00%	100,00%	100,00%
	Nox (kg/an)	REF	5,00%	70,00%	15,00%	100,00%	100,00%
	CO (kg/an)	REF	30,00%	25,00%	15,00%	100,00%	100,00%
	Particules (kg/an)	REF	30,00%	97,00%	15,00%	97,00%	97,00%
	HC (kg/an)	REF	13,00%	25,00%	15,00%	100,00%	100,00%
	% gain	MOYENNE	20,83%	56,83%	15,00%	99,50%	99,50%

MRC DE JOLIETTE	Diésel	Biodiésel (B20)	Gaz naturel (CNG)	Hybride	Électrique	Hydrogène
	ECONOMIQUE					
Investissement total (\$)	1 500 000 \$	1 500 000 \$	2 070 000 \$	1 854 000 \$	3 760 200 \$	5 400 000 \$
par véhicule (\$)	250 000 \$	250 000 \$	300 000 \$	384 000 \$	700 000 \$	720 000 \$
Station de recharge/véhicule (\$)	0 \$	0 \$	75 000 \$	0 \$	1 700 \$	180 000 \$
subvention (\$)	0 \$	0 \$	30 000 \$	75 000 \$	75 000 \$	0 \$
Frais d'exploitation (\$/an)	2 035 855 \$	1 940 812 \$	1 542 753 \$	1 734 628 \$	38 213 \$	223 557 \$
Énergie (\$)	2 008 177 \$	1 913 133 \$	1 517 204 \$	1 706 950 \$	27 568 \$	63 873 \$
Maintenance (\$)	27 678 \$	27 678 \$	25 549 \$	27 678 \$	10 646 \$	159 683 \$
Retour sur investissement (an)	Référence		1,16	1,18	1,13	2,15
Gain par rapport au diésel (\$/an)	0 \$	95 043 \$	493 102 \$	301 226 \$	1 997 642 \$	1 812 298 \$
% gain	REF	4,67%	24,22%	14,80%	98,12%	89,02%
Coût pour la société (\$/an)	170 555 \$	167 049 \$	115 892 \$	145 779 \$	4 698 \$	3 221 \$
GES (\$)	170 017 \$	166 640 \$	115 803 \$	145 322 \$	4 687 \$	3 210 \$
PM (\$)	368 \$	258 \$	11 \$	313 \$	11 \$	11 \$
Nox (\$)	110 \$	105 \$	33 \$	94 \$	0 \$	0 \$
CO (\$)	32 \$	23 \$	24 \$	27 \$	0 \$	0 \$
O3 (\$)	28 \$	24 \$	21 \$	23 \$	0 \$	0 \$
% gain	REF	2,06%	32,05%	14,53%	97,25%	98,11%
	ENVIRONNEMENT					
GES émis (tCO2eq/an)	4 250	4 166	2 895	3 633	117	80
COV (kg/an)	466	326	350	396	0	0
SO2 (kg/an)	10	8	0	9	0	0
Nox (kg/an)	933	886	280	793	0	0
CO (kg/an)	281	197	211	239	0	0
Particules (kg/an)	2	1	0	2	0	0

MRC DE JOLIETTE		Diésel	Biodiésel (B20)	Gaz naturel (CNG)	Hybride	Électrique	Hydrogène
HC (kg/an)		153	133	115	130	0	0
COV (kg/an)		REF	30,00%	25,00%	15,00%	100,00%	100,00%
SO2 (kg/an)		REF	17,00%	99,00%	15,00%	100,00%	100,00%
Nox (kg/an)		REF	5,00%	70,00%	15,00%	100,00%	100,00%
CO (kg/an)		REF	30,00%	25,00%	15,00%	100,00%	100,00%
Particules (kg/an)		REF	30,00%	97,00%	15,00%	97,00%	97,00%
HC (kg/an)		REF	13,00%	25,00%	15,00%	100,00%	100,00%
% gain	MOYENNE		20,83%	56,83%	15,00%	99,50%	99,50%

ANNEXE 10. DÉTAILS DE L'ANALYSE MULTICRITÈRE

	Urbain	Pondération Péri-Urbain	Rural	Echelle d'évaluation de 1 à 5
Economique				
Investissement à l'achat (avec subvention)	3	4	5	1 : +100 % du prix de base, 2 : +50 % du prix, 3 : +25 % du prix, 4 : +15 % du prix, 5 : prix de base
Frais d'exploitation (énergie et maintenance)	4	4	5	1 : pas d'économie, 2 : une économie de 5 %, 3 : une économie de 15 %, 4 : une économie de 25 %, 5 : une économie de plus de 50 %
Coûts pour la société (GES, NOx, SO2, COV, HAP, PM)	2	2	1	1 : aucune réduction des coûts pour la société, 2 : réduction de 5 %, 3 : réduction de 25 %, 4 : réduction de 50 %, 5 : réduction de plus de 50 %
Technique				
Autonomie	3	4	5	1 : pas possible de faire le km prévu à la journée, 2 : possible de faire 1,25 fois le km prévu à la journée, 3 : possible de faire 1,5 fois le km prévu à la journée, 4 : possible de faire 2 fois, 5 : possible de faire 2,5 fois.
Flexibilité/fiabilité	2	3	4	1 : fort changement apporté dans l'exécution des circuits/risque de panne en hiver, 2 : changement modéré mais difficilement acceptable, 3 : changement modéré mais acceptable, 4 : peu ou pas de changement, 5 : aucune modification
Expertise/retour d'expérience	2	2	3	1 : uniquement des prototypes, 2 : aucun véhicule qui circule sur les routes du Québec, 3 : 2 à 5 de présence sur les routes québécoises, 4 : 5 à 10 ans de présences, 5 : plus de 10 ans de présence

Environnement	Pondération			Echelle d'évaluation de 1 à 5
	Urbain	Péri-Urbain	Rural	
Emission de GES	3	2	1	1 : plus de 19 kgCO ₂ eq/km, 2 : entre 17 et 19, 3 : entre 10 et 17, 4 : entre 1 et 9 , 5 : moins de 1
Gestion en fin de vie	2	2	1	1 : aucune filière de recyclage existante dans le Nord-Amérique, 2 : aucune filière de recyclage existante au Québec, 3 : filière de recyclage en développement, 4 : filière de recyclage existante et performante, 5 : recyclage et réemploi
Social				
Environnement de travail	3	2	2	1 : pas de changement, 2 : faible amélioration, 3 : amélioration moyenne et notifiée par les usagers (citoyens et chauffeurs), 4 : amélioration appréciée par les citoyens et chauffeurs, 5 : amélioration nette de la qualité de l'environnement de travail
Image véhiculée	2	1	1	1 : aucun changement, 2 : demande des clients/tendance dans les appels d'offres (AO), 3 : incorporation dans les AO, 4 : impact positif et technologie non connue du grand public, 5 : nouvelles technologies à développer : précurseur sur le marché
Impact sur la santé humaine	3	2	1	1 : aucun changement, 2 : réduction de 15 %, 3 : réduction de 30 %, 4 : réduction de 75 %, 5 : élimination des impacts sur la santé humaine

		Diésel		Biodiésel (B20)		Gaz naturel (CNG)		Hybride		Électrique		Hydrogène
Economique												
Investissement à l'achat (avec subvention)	5	Prix de base	5	Prix de base	3	+20 % du prix (La Presse, 2017)	2	+50 % du prix (Danna, 2011)	1	+250 % du prix, (Laurin, 2020)	1	+290 % du prix (Fuel Cells and Hydrogen, 2017)
Frais d'exploitation (énergie et maintenance)	1	Pas d'économie	2	économie en moyenne de 5 %	4	économie en moyenne de 25 %	3	économie moyenne de 15 %	5	économie moyenne de 98 %	5	économie moyenne de 89 %
Coûts pour la société (GES, NOx, SO2, COV, HAP, PM)	1	Aucune réduction	2	Réduction moyenne de 5 %	3	Réduction moyenne de 30 %	2	Réduction de 15 %	5	Réduction de 97 %	5	Réduction de 93 %
Technique												
Autonomie	5	Cas par défaut	5	Pas de modification de l'autonomie	4	Autonomie équivalente au diésel, mais consommation supplémentaire (plus de volume à embarquer)	5	Autonomie équivalente au diésel	4	Autonomie de 400 km, mais cas de la MRC Arthabaska moyenne de 180 km/jour	4	Autonomie équivalente au diésel, mais consommation supplémentaire (plus de volume à embarquer)
Flexibilité/fiabilité	5	Aucune modification	3	Hiver : moteur temps d'adaptions au biodiésel qui est plus huileux	3	Remplissage à une station de ravitaillement, peut prendre plus de temps. Pas beaucoup de station publique.	4	Véhicule immobilisé une semaine pour l'installation, puis aucune modification	2	Changement dans la méthode de vidage de la benne et dans le fonctionnement du bras mécanisé	3	Remplissage à une station de ravitaillement, peut prendre plus de temps
Expertise/retour d'expérience	5	Cas par défaut	5	Depuis l'étude de 2003 sur les Biobus de Montréal	4	Depuis 2015 chez TTI Environnement inc.	3	En cours de déploiement depuis 2018	2	En cours de déploiement, en mars 2020.	1	En test en Europe, pas de prototype au Québec connu.

		Diésel		Biodiésel (B20)		Gaz naturel (CNG)		Hybride		Électrique		Hydrogène
Environnement												
Emission de GES (kgCO2eq/km)	1	19,9	2	19,6	3	13,6	2	17,06	5	0,55	4	0,37
Gestion en fin de vie	4	Filière de recyclage existante et supposément performante	4	Filière de recyclage existante et supposément performante	4	Filière de recyclage existante et supposément performante	3	Que faire des condensateurs? Sinon filière de recyclage existe et supposément performante	2	Filière de recyclage des batteries en voie de développement au Québec	1	Que faire des piles à combustibles? Filière considérée comme inexistante au Québec
Social												
Environnement de travail	1	Cas par défaut	2	Faible amélioration : moins de particules émis en sortie de pot d'échappement	3	Réduction du bruit de -10 dB	4	Réduction du bruit de 50 % (arrêt moteur lors de la collecte)	5	Aucun bruit (moteur)	5	Aucun bruit (moteur)
Image véhiculée	1	Cas par défaut	2	Apparition dans les appels d'offres	3	Apparition dans les appels d'offres, et image positive pour l'entreprise	4	Technologie non connue du grand public dans ce domaine	4	Technologie non connue du grand public dans ce domaine	5	Technologie à développer
Impact sur la santé humaine	1	Cas par défaut	2	21 % en moyenne (COV, SO2, NOx, CO, PM, HC)	3	58 % en moyenne (COV, SO2, NOx, CO, PM, HC)	2	15 % en moyenne (COV, SO2, NOx, CO, PM, HC)	4	99,5 % en moyenne (COV, SO2, NOx, CO, PM, HC)	4	99,5 % en moyenne (COV, SO2, NOx, CO, PM, HC)